

TUGAS AKHIR - TE 141599

**MULTI OBJEKTIF OPTIMAL POWER FLOW
UNTUK MINIMISASI BIAYA OPERASI
PEMBANGKIT DAN RUGI JARINGAN
MENGUNAKAN ALGORITMA SERIGALA**

Lukman Hendarwin
NRP 2211100057

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.sc, Ph.D
Yun Tonce Kusuma Priyanto, ST, MT

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**MULTI OBJECTIVE OPTIMAL POWER FLOW TO
MINIMIZE GENERATION OPERATION COST
AND LOSSES USING WOLF PACK ALGORITHM**

Lukman Hendarwin
NRP 2211100057

Advisor
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
Yun Tonce Kusuma Priyanto, ST, MT

DEPARTEMEN OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2015

**MULTI OBJEKTIF OPTIMAL POWER FLOW
UNTUK MINIMISASI BIAYA OPERASI PEMBANGKIT
DAN RUGI JARINGAN MENGGUNAKAN
ALGORITMA SERIGALA**

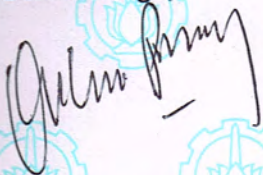
TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

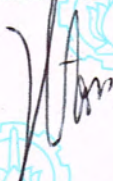
Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
NIP. 1949 07 15 1974 12 1001

Dosen Pembimbing II,



Yun Tonce Kusuma Priyanto, ST, MT
NIP. 1984 06 16 2012 12 1001

**SURABAYA
JULI, 2015**

MULTI OBJEKTIF OPTIMAL POWER FLOW UNTUK MINIMISASI BIAYA OPERASI PEMBANGKIT DAN RUGI JARINGAN MENGUNAKAN ALGORITMA SERIGALA

Nama : Lukman Hendarwin
NRP : 2211100057
Jurusan : Teknik Elektro
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
2. Yun Tonce Kusuma Priyanto, ST, MT

ABSTRAK

Saat ini seiring dengan perkembangan jaman, pertumbuhan jumlah penduduk dan kemajuan teknologi menyebabkan permintaan energi listrik semakin meningkat, berbagai cara dilakukan untuk menyalurkan energi listrik dengan pemberdayaan berbagai macam sumber energi untuk mendapatkan jumlah energi listrik yang efisien dan harga pembangkitan yang ekonomis. Pertumbuhan permintaan energi listrik meningkat setiap waktu sedangkan jumlah sumber energi listrik berkurang secara signifikan setiap waktu.

Oleh karena itu, untuk menyelesaikan ketidakseimbangan antara pertumbuhan beban dan jumlah energi yang tersedia, diperlukan sebuah metode untuk memperoleh energi listrik seoptimal mungkin dengan biaya operasi pembangkitan seminimal mungkin. Selain itu, jarak antara pusat pembangkit dengan beban sangat jauh sehingga menyebabkan rugi rugi transmisi yang besar. Untuk mendapatkan losses terendah dan biaya operasi pembangkitan yang ekonomis, penulis melakukan simulasi *Multi Objective Optimal Power Flow* menggunakan Algoritma Serigala pada software MATLAB

Halaman ini sengaja dikosongkan

MULTI OBJECTIVE OPTIMAL POWER FLOW TO MINIMIZE GENERATION OPERATION COST AND LOSSES USING WOLF PACK ALGORITHM

Name : Lukman Hendarwin
NRP : 2211100057
Department : Electrical Engineering
Adivsor : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
2. Yun Tonce Kusuma Priyanto, ST, MT

ABSTRACT

Nowadays, population growth and technological advances led to the increasing demand for electrical energy, various methods are used to deliver electrical energy to empower a wide variety of energy sources to obtain the amount of electrical energy generation efficient and economical price. Growth in demand for electricity increases every time while the number of sources of electrical energy is significantly reduced every time.

Therefore, to resolve the imbalance between growth load and the amount of energy available, we need a method to obtain the optimum electrical energy generation operating costs to a minimum. In addition, the distance between the centre of power plant to the load, causing great loss transmission loss. To get the lowest losses and economical operating costs of generation, the authors conducted a simulation Multi Objective Optimal Power Flow using Wolf Pack Algorithm with the MATLAB software.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur bagi Tuhan Yang Maha Esa atas kemudahan, kesehatan, dan kesempatan yang telah dikaruniakan dari awal hingga akhir pengerjaan Tugas Akhir berjudul:

Multi Objektif Optimal Power Flow untuk Minimisasi Biaya Operasi Pembangkitan dan Rugi Jaringan Menggunakan Algoritma Serigala

Penyusunan Tugas Akhir ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga di Jurusan Teknik Elektro ITS Surabaya, selain itu juga diharapkan mampu menambah wawasan dalam bidang keahlian teknik sistem tenaga.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini dan selama studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, penulis mendapatkan bantuan, bimbingan, dan dukungan tak ternilai dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D selaku dosen pembimbing pertama, atas kesediaannya memberikan masukan dan waktu untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Yun Tonce Kusuma Priyanto, ST, MT dosen pembimbing kedua, atas bimbingan, perhatian dan penjelasan serta motivasi yang diberikan.
3. Seluruh Dosen Bidang Studi Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro ITS, atas bimbingan serta ilmu - ilmu perkuliahan yang telah diberikan.
4. Kedua orang tua yang tercinta: Alm. Budiawan dan Tan Moy Fa yang selalu memberikan do'a, nasihat, dukungan serta motivasi yang telah diberikan untuk keberhasilan penulis.
5. Kakak – kakak saya yang tercinta: Aiwen, Feriatno, Aisian Ningrum, dan Tan A Yunta yang membuat penulis termotivasi untuk menjadi teladan sejati sebagai adik yang baik.
6. Keluarga Besar Kalpataru Elektro ITS yang selalu memberi semangat dan selalu membantu memberi motivasi yang sangat luar biasa.

7. Teman – teman seperjuangan : Rizki Achmad Tri Rachmanto, Herbanindya Febri Trusatmaji, Ivas Muzamil, Rizki Nur Fajri Adhim atas waktu, ide – ide, semangat dan dukungan yang diberikan kepada penulis. Terima kasih atas kerja sama yang diberikan. Kebersamaan kita tidak mungkin dilupakan.
8. Anak Kontrakan Bhaskara V no : Hasrul, Nazmi Rasyidin, Rusyadi Wihardi, Rahardika Nur Permana, dan Ilham Laenur Hikmat atas kebersamaannya dalam satu atap kontrakan yang selalu menjadi penyemangat bagi penulis. Kebersamaan kita tidak mungkin untuk dilupakan.
9. Teman WP Crew: Mas Kharom, Mas Adib, Yosep Warman Hutasoit, Dylan Adhitya K, Arief Budiyanto Handoyo, Vigor Aryaditya, Ahmad Danyalin, Nugrahadi Yanuarso, Achmad Abdul Ghoni, Akhmad Sudaryono, Aldo Rizal N, Kharismawan, Rahmadi Ridho Anjiko, Lucky Andika N, Roy Fachri, Grignion Kevin, Gilang Dwi P, Ahmad Falah Alfandana, Satria Simamora, dan Yosua Pandopotan yang turut serta menjadi penyemangat dan penginspirasi bagi penulis untuk menjalani kehidupan perkuliahan
10. Freeletics Surabaya yang menjadi penyemangat untuk menyadari pentingnya berolahraga.
11. Seluruh rekan – rekan angkatan 2008, 2009, 2010 dan 2011 atas kebersamaan dan kerjasamanya selama ini.
12. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, para dosen, karyawan, mahasiswa, serta rekan-rekan HIMATEKTRO atas dukungan, masukan, dan kerjasamanya selama masa kuliah dan proses pengerjaan Tugas Akhir.
13. Anggota Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga listrik (B 103). Terima kasih atas kerja sama yang diberikan. Kebersamaan kita tidak mungkin dilupakan.
14. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan Tugas Akhir yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Tak ada gading yang tak retak. Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan kearah yang lebih baik.

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
Daftar Isi	xi
Daftar Gambar	xv
Daftar Tabel	xvii
BAB 1 Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Permasalahan	3
1.4. Tujuan Permasalahan.....	3
1.5. Kontribusi Penelitian	3
1.6. Metode Penelitian	4
1.7. Sistematika Penulisan.....	5
1.8. Relevansi	5
BAB 2 Representasi Sistem Tenaga Listrik	7
2.1. Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.1.1. Saluran Transmisi	8
2.1.2. Saluran Distribusi	12
2.1.3. Transformator	13
2.1.4. Kapasitor dan Reaktor <i>Shunt</i>	16
2.1.5. Beban (<i>Load</i>).....	16
2.2. Analisa Aliran Daya	17
2.2.1. Persamaan Arus dan Tegangan.....	19

2.2.2.	Persamaan Aliran Daya	21
2.3.	Metode <i>Newton Raphson</i>	22
2.3.1.	Penyelesaian Aliran Daya.....	23
2.4.	Optimal Power Flow	25
2.5.	Fungsi Objektif.....	26
2.5.1.	Fungsi Biaya Pembangkitan	26
2.5.2.	Fungsi Rugi Jaringan.....	27
2.6.	Aplikasi Optimal Power Flow	27
2.7.	<i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	28
2.8.	Algoritma Serigala	30
BAB 3	Metodologi Penelitian	33
3.1.	Perencanaan Penelitian.....	33
3.2.	Studi Literatur	34
3.3.	Pengelolaan Data.....	34
3.4.	Penentuan Fungsi Objektif	34
3.4.1.	Fungsi Rugi Jaringan.....	35
3.4.2.	Fungsi Biaya Pembangkitan	35
3.5.	Penentuan Konstrain	35
3.5.1.	Konstrain Kapasitas Pembangkit.....	35
3.5.2.	Keseimbangan Aliran Daya.....	37
3.6.	Multi Objektif OPF Menggunakan <i>Weighted Sum Method</i>	37
3.7.	Simulasi Algoritma Serigala untuk Menyelesaikan Multi Objektif OPF	38
3.7.1.	Inisialisasi Awal Algoritma Serigala	40
3.7.2.	Pergerakan Serigala	40
3.8.	Simulasi Algoritma Particle Swarm Optimization untuk Menyelesaikan Multi Objektif OPF	41
3.8.1.	Perhitungan Nilai Fitness Awal	42

3.8.2. Update <i>Velocity</i> dan Posisi Partikel	42
3.8.3. Update Personal best dan Global Best	42
BAB 4 Simulasi dan Analisis	43
4.1. Data IEEE 30 Bus	44
4.2. Parameter Kecerdasan Buatan	48
4.2.1. <i>Particle Swarm Optimization</i>	48
4.2.2. Algoritma Serigala	48
4.3. Simulasi OPF Menggunakan Satu Fungsi Objektif	49
4.3.1. <i>Economic Dispatch</i>	49
4.3.2. <i>Power Loss Minimization</i>	52
4.4. Simulasi OPF Menggunakan Fungsi Multi Objektif	55
4.4.1. <i>Particle Swarm Optimization</i>	56
4.4.2. Algoritma Serigala	57
4.4.3. Perbandingan Algoritma Serigala dan PSO	58
BAB 5 Kesimpulan dan Saran	59
5.1. Kesimpulan	59
5.2. Saran	59
Daftar Pustaka	61
Lampiran	63
Riwayat Hidup Penulis	67

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data IEEE 30 Bus	44
Tabel 4.2 Data Saluran IEEE 30 Bus	45
Tabel 4.3 Data Generator IEEE 30 Bus	46
Tabel 4.4 Data <i>Capasitor Bank</i> IEEE 30 Bus	46
Tabel 4.5 Data Tap Setting Trafo IEEE 30 Bus	47
Tabel 4.6 Data Fungsi Biaya Pembangkit Sistem IEEE 30 Bus	47
Tabel 4.7 Data Spesifikasi CPU	47
Tabel 4.8 Parameter PSO	48
Tabel 4.9 Parameter Algoritma Serigala	48
Tabel 4.10 Daya Aktif, Biaya Pembangkitan, dan Rugi Hasil Simulasi OPF	50
Tabel 4.11 Daya Aktif, Biaya Pembangkitan, dan Rugi Hasil Simulasi OPF	51
Tabel 4.12 Perbandingan Hasil Simulasi <i>Economic Dispatch</i>	52
Tabel 4.13 Daya Aktif, Biaya Pembangkitan, dan Rugi Hasil Simulasi OPF	53
Tabel 4.14 Daya Aktif, Biaya Pembangkitan, dan Rugi Hasil Simulasi OPF	54
Tabel 4.15 Perbandingan Hasil Simulasi <i>Power Loss Minimization</i>	55
Tabel 4.16 Daya aktif, biaya pembangkitan, dan rugi hasil simulasi OPF	56
Tabel 4.17 Daya Aktif, Biaya Pembangkitan, dan Rugi Hasil Simulasi OPF	57
Tabel 4.18 Perbandingan Hasil Simulasi <i>Economic Power Loss Minimization</i>	58

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	8
Gambar 2.2 Rangkaian Pengganti Saluran Transmisi.....	10
Gambar 2.3 Model Satu Fasa.Diagram dan Rangkaian Ekiivalen	19
Gambar 2.4 Kurva Persamaan Garis	22
Gambar 3.1 Flowchart Tahap-tahap Penelitian Optimal Power Flow....	33
Gambar 3.2 Flowchart Penyelesaian OPF Menggunakan Algoritma Serigala	39
Gambar 3.3 Flowchart Penyelesaian OPF Menggunakan PSO.....	41
Gambar 4.1 Grafik Konvergensi Biaya Pembangkitan PSO	49
Gambar 4.2 Grafik Konvergensi Biaya Pembangkitan Algoritma Serigala	50
Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Konvergensi Satu Fungsi Objektif....	51
Gambar 4.4 Grafik Konvergensi Rugi Jaringan PSO.....	53
Gambar 4.5 Grafik Konvergensi Rugi Jaringan Algoritma Serigala.....	54
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Konvergensi Satu Fungsi Objektif ...	55
Gambar 4.7 Grafik Konvergensi <i>Economic Power Loss Minimization</i> PSO	56
Gambar 4.8 Grafik Konvergensi <i>Economic Power Loss Minimization</i> Algoritma Serigala.....	57
Gambar 4.9 Perbandingan Grafik Konvergensi <i>Multi Objective</i> OPF ...	58

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tenaga listrik merupakan kebutuhan fundamental yang memiliki peranan multifungsi. Daya listrik meningkat seiring perkembangan zaman. Faktor utama peningkatan kebutuhan listrik tak lepas dari peningkatan populasi penduduk, peningkatan pembangunan infrastruktur, dan kemajuan teknologi. Peningkatan kebutuhan tersebut perlu diimbangi dengan pertumbuhan dan pengelolaan sumber pembangkit tenaga listrik sehingga mampu menyediakan tenaga listrik secara berlanjut untuk memenuhi kebutuhan fundamental.

Berbagai cara dilakukan untuk menyalurkan energi listrik dengan pemberdayaan berbagai macam sumber energi untuk mendapatkan jumlah energi listrik yang efisien dan harga pembangkitan yang ekonomis. Pertumbuhan permintaan energi listrik meningkat setiap waktu sedangkan jumlah sumber energi listrik berkurang secara signifikan setiap waktu. Oleh karena itu, untuk menyelesaikan ketidakseimbangan antara pertumbuhan beban dan jumlah energi yang tersedia, diperlukan sebuah metode untuk memperoleh energi listrik seoptimal mungkin dengan harga pembangkitan seminimal mungkin.

Industri tenaga listrik menjadi perhatian yang cukup penting oleh pemerintah, politisi, industri besar, dan investor untuk memprivatisasi, restrukturisasi, dan deregulasi. Sebelum deregulasi, hampir semua elemen industri listrik seperti pembangkit listrik, penjualan listrik massal, belanja modal, dan keputusan investasi sangat diperhatikan. Beberapa peraturan tersebut berada di tingkat negara, dan beberapa di tingkat nasional. Dengan demikian deregulasi baru dalam industri listrik menjadi tantangan baru. Namun, meskipun perubahan struktur yang berbeda, aturan pasar, dan fluktuasi, persyaratan yang mendasar untuk operasi sistem tenaga menjadi aman, ekonomis, dan dapat diandalkan tetap sama.

Selain itu, jarak antara pusat pembangkit dengan beban sangat jauh mengakibatkan terjadinya rugi transmisi yang besar. Untuk meminimisasi rugi transmisi, penulis melakukan inovasi dengan melakukan simulasi menggunakan software MATLAB untuk mendapatkan nilai rugi jaringan terendah dan biaya pembangkitan yang ekonomis menggunakan Algoritma Serigala.

Algoritma Serigala / *Wolf Pack Algorithm* (WPA) merupakan salah satu algoritma yang diinspirasi dari biologi. Algoritma Serigala dibentuk dan dikembangkan oleh Sayedali Mirjalili di Griffith University. Algoritma ini terinspirasi oleh perilaku serigala. Serigala adalah hewan liar yang memiliki kemampuan beradaptasi yang luar biasa dalam menyusun strategi berburu dan menjaga keberlangsungan hidupnya. Serigala yang terkuat mampu memimpin kumpulan serigala lainnya dalam melakukan perburuan untuk memperoleh makanan agar dapat bertahan hidup. Kemampuan serigala terkuat yang terlihat diantaranya yaitu kemampuan untuk melatih kumpulan serigala, kemampuan menyusun strategi berburu, dan regenerasi serigala terkuat.

Particle Swarm Optimization (PSO) diusulkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995, berdasarkan perilaku kawanan binatang, seperti sekumpulan burung dan ikan di alam, sehingga disebut sebagai *swarm intelligence*. *Particle Swarm Optimization* adalah salah satu metode optimasi yang terinspirasi dari perilaku gerakan kawanan hewan seperti ikan (*school of fish*), hewan herbivor (*herd*), dan burung (*flock*) yang kemudian tiap objek hewan disederhanakan menjadi sebuah partikel. Suatu partikel dalam ruang memiliki posisi yang dikodekan sebagai vektor koordinat. Vektor posisi ini dianggap sebagai keadaan yang sedang ditempati oleh suatu partikel di ruang pencarian. Setiap posisi dalam ruang pencarian merupakan alternatif solusi yang dapat dievaluasi menggunakan fungsi objektif. Setiap partikel bergerak dengan kecepatan

Tujuan penelitian ini untuk menunjukkan perbandingan hasil penyelesaian persoalan Multi Objektif Optimal Power Flow menggunakan metode *Wolf Pack Algorithm* dan *Particle Swarm Optimization*.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana pengaturan yang optimal untuk meminimisasi rugi pada sistem dan biaya operasi pembangkitan bila dipergunakan satu persatu dan secara simultan?
2. Bagaimana perbandingan nilai fitness terbaik dari metode Algoritma Serigala dan *Particle Swarm Optimization*?

1.3. Batasan Permasalahan

Untuk menyelesaikan masalah dalam Tugas Akhir ini, maka perlu diberi batasan - batasan dan asumsi sebagai berikut:

1. Simulasi Algoritma Serigala dengan menggunakan software MATLAB pada data IEEE 30 Bus.
2. Fungsi objektif yang diatur secara optimal meliputi:
 - Fungsi biaya pembangkitan
 - Fungsi rugi jaringan
3. Penyelesaian Multi Objektif Optimal Power Flow menggunakan 2 program yang berbeda, yaitu:
 - Algoritma Serigala (WPA)
 - *Particle Swarm Optimization* (PSO)

1.4. Tujuan Permasalahan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk meminimisasi rugi pada sistem dan biaya pembangkitan.
2. Untuk mengetahui nilai konvergensi / *fitness* terbaik dari metode Algoritma Serigala dan *Particle Swarm Optimization*.

1.5. Kontribusi Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi sebagai berikut:

1. Meningkatkan performa dari sistem tenaga listrik khususnya di dalam permasalahan aliran daya aktif dan reaktif pada saluran transmisi.
2. Menambah literatur baru tentang aplikasi konsep Algoritma Serigala dalam permasalahan Multi Objektif Optimal Power Flow.
3. Memberikan literatur baru tentang perbandingan konsep Algoritma Serigala dengan berbagai macam konsep kecerdasan buatan yang lain, khususnya dalam aplikasi pada Power System Engineering.

1.6. Metode Penelitian

Pada Tugas Akhir ini akan dilakukan penelitian tentang Multi Objektif Optimal Power Flow untuk minimisasi biaya operasi pembangkitan dan rugi jaringan menggunakan Algoritma Serigala. Perhitungan Multi Objektif OPF dilakukan dengan menambahkan konstrain yang telah ditentukan akan disimulasikan dalam program MATLAB. Tahapan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah:

1. Studi Literatur
Literatur yang digunakan berasal dari jurnal, prosiding, text book, dan Tugas Akhir sebelumnya. Dalam studi literatur dipelajari teori pendukung yang berisi tentang *Power Flow*, *Economic Dispatch*, *Optimal Power Flow*, karakteristik saluran, penggunaan Algoritma Serigala dan *Particle Swarm Optimization* pada MATLAB untuk perhitungan *Multi Objective Optimal Power Flow*.
2. Pengumpulan Data
Data yang dibutuhkan diantaranya adalah parameter pengaturan kecerdasan buatan untuk Algoritma Serigala dan *Particle Swarm Optimization*, Data saluran *IEEE 30 Bus*, data pembangkitan, data beban, dan kapasitas maksimum.
3. Pembuatan Program dalam *M-File*
Pembuatan program untuk melakukan optimasi berdasarkan literatur yang telah dipelajari dan diterapkan pada MATLAB dalam bentuk *M-File*.
4. Simulasi dan Analisis
Simulasi menggunakan fungsi objektif yang telah ditentukan dan melakukan analisa terhadap perbandingan Algoritma Serigala dan *Particle Swarm Optimization*
5. Penulisan Buku
Hasil penelitian yang telah dilakukan dilaporkan dalam bentuk laporan Tugas Akhir dan dikembangkan dalam bentuk paper. Laporan ditulis berdasarkan kesimpulan dari permasalahan yang dianalisis beserta tahapan yang ada di dalamnya.

1.7. Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah pembahasan, dalam penulisan Tugas Akhir ini akan dibagi menjadi lima bab dan beberapa subbab dengan sistematika sebagai berikut:

- Bab 1: Pendahuluan
 Bab ini membahas mengenai latar belakang, tujuan, rumusan masalah, batasan masalah, sistematika pembahasan, metodologi, dan relevansi.
- Bab 2: Tinjauan Pustaka
 Bab ini membahas teori penunjang mengenai analisa aliran daya, Algoritma Serigala dan *Particle Swarm Optimization*.
- Bab 3: Metodologi Penelitian
 Bab ini menguraikan metode pengaplikasian konsep Algoritma Serigala dan konsep *Particle Swarm Optimization* pada OPF.
- Bab 4: Simulasi dan Analisis
 Bab ini berisi tentang proses simulasi dan analisa hasil simulasi.
- Bab 5: Kesimpulan dan Saran
 Bab ini merupakan bab terakhir yang berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil simulasi dan analisis pada Tugas Akhir dan saran untuk pengembangan lebih lanjut.

1.8. Relevansi

Dari hasil simulasi dan analisis dapat diketahui pengaturan variabel sistem yang optimal pada sistem. Pada permasalahan *Single Objective OPF* dan *Multi Objective OPF* memiliki pengaturan variabel sistem yang berbeda. Kompleksitas *Multi Objective OPF* akan menghasilkan analisis yang semakin mendekati nilai real sistem.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

REPRESENTASI SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1. Sistem Tenaga Listrik

Sistem Pembangkitan adalah salah satu bagian utama dalam struktur sistem tenaga listrik, pembangkit pada sistem tenaga listrik berperan untuk menghasilkan energi. Sumber energi utama pada pembangkit berasal dari sumber energi primer yang tersedia dari alam, kemudian dikonversikan menjadi energi listrik.

Semakin berkembangnya teknologi, kebutuhan akan tenaga listrik sejalan dengan semakin meningkatnya taraf hidup masyarakat. Meningkatnya kebutuhan akan tenaga listrik, menuntut suatu sistem tenaga listrik yang mempunyai keandalan dalam penyediaan dan penyaluran dayanya. Dalam penyaluran tenaga listrik dari Gardu Induk ke pusat-pusat beban diperlukan saluran distribusi. Analisis aliran daya merupakan bagian penting dari perencanaan untuk melakukan optimasi dalam sistem tenaga listrik. Pada dasarnya sasaran utama dari semua analisa aliran daya adalah menentukan besar dan sudut fasa tegangan pada setiap bus, dengan diketahuinya tegangan maka daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dapat dihitung. Jika P dan Q pada dua buah bus diketahui maka aliran daya dengan jelas dapat diketahui, serta rugi daya saluran penghubung dapat diketahui.

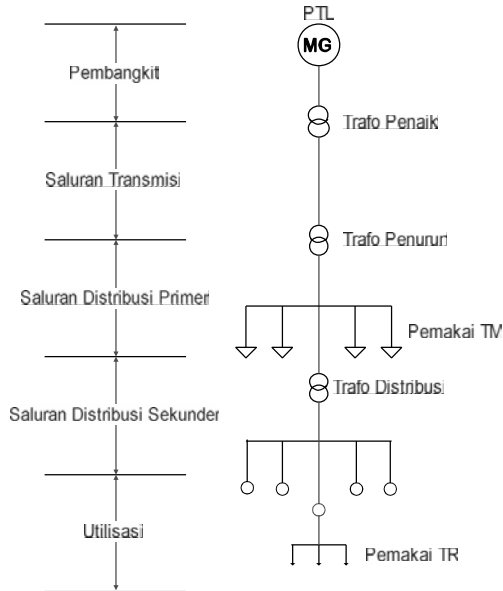
Sistem pembangkitan adalah tempat dimana proses pembangkitan tenaga listrik. Secara konvensional proses pembangkitan tenaga listrik merupakan proses konversi energi primer (bahan bakar atau potensi tenaga air) menjadi energi mekanik penggerak generator, yang selanjutnya energi mekanik ini diubah menjadi energi listrik generator.

Dalam sistem tenaga listrik terdapat empat bagian utama yang diantaranya adalah pembangkit, transmisi, distribusi, dan beban. Pembangkit merupakan komponen utama yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Salah satu komponen yang penting dalam pembangkit adalah generator. Generator merupakan perangkat utama yang mengubah putaran (energi mekanik) menjadi energi listrik melalui induksi.

Energi listrik dibangkitkan pada pembangkit tenaga listrik (PTL) yang dapat merupakan suatu pusat listrik tenaga uap (PLTU), pusat listrik tenaga air (PLTA), pusat listrik tenaga gas (PLTG), pusat listrik tenaga diesel (PLTD), ataupun pusat listrik tenaga nuklir (PLTN). PTL biasanya

membangkitkan energi listrik pada tegangan menengah (TM), yaitu pada umumnya antara 6 dan 20 KV.

Sistem Penyaluran adalah salah satu bagian utama dalam struktur sistem tenaga listrik yang berperan untuk mengirim daya listrik yang dimulai dari pembangkit kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi dan disalurkan ke instalasi pengguna tenaga listrik dengan menggunakan saluran distribusi.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

2.1.1. Saluran Transmisi

Pada sistem tenaga listrik yang besar, atau jika PTL terletak jauh dari pelanggan, maka tenaga listrik itu perlu ditransmisikan melalui saluran transmisi, dan tegangannya harus dinaikkan dari TM menjadi tegangan tinggi (TT). Pada jarak yang sangat jauh malah diperlukan tegangan ekstra tinggi (TET). Menaikkan tegangan itu dilakukan di gardu induk (GI) dengan mempergunakan transformator penaik (*step-up transformer*).

Kemampuan sistem transmisi dengan tegangan yang lebih tinggi akan menjadi jelas jika dilihat pada kemampuan transmisi dari suatu saluran transmisi, kemampuan ini biasanya dinyatakan dalam Mega Volt

Ampere (MVA) Transmisi dapat menyalurkan tenaga listrik dari GI Pembangkitan ke GI Tegangan Tinggi dan dari GI Tegangan Tinggi ke GI Distribusi. Transmisi tegangan tinggi berfungsi menyalurkan energi listrik dari satu gardu induk ke gardu induk lainnya.

Saluran transmisi terdiri dari konduktor yang direntangkan antara tiang-tiang (*tower*) melalui isolator-isolator, dengan sistem tegangan tinggi. Standar tegangan tinggi yang berlaku di Indonesia adalah: 30 KV, 70 KV dan 150 KV.

Suatu saluran transmisi udara dapat digambarkan sebagai rangkaian tertutup. Resistansi (R), induktansi (L), kapasitansi (C) dan konduktansi bocor (G) dari suatu rangkaian tertutup tersebut didistribusikan dengan seragam sepanjang saluran.

Mendekati pusat pemakaian tenaga listrik, yang dapat merupakan suatu industri atau kota, tegangan tinggi diturunkan menjadi tegangan menengah (TM). Hal ini juga dilakukan pada suatu GI dengan mempergunakan transformator penurun (*step down transformer*). Standar tegangan tinggi yang berlaku di Indonesia adalah: 30 KV, 70 KV dan 150 KV.

Beberapa hal yang perlu diketahui dalam mempelajari saluran transmisi:

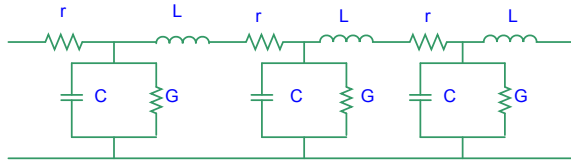
1. Transmisi 30 KV dan 70 KV yang ada di Indonesia, secara berangsur-angsur mulai ditiadakan (tidak digunakan).
2. Transmisi 70 KV dan 150 KV ada di Pulau Jawa dan Pulau lainnya di Indonesia. Sedangkan transmisi 275 KV dikembangkan di Sumatera.
3. Transmisi 500 KV ada di Pulau Jawa.

Pada saluran transmisi di Indonesia, konstruksi transmisi yang ada saat ini terdiri dari:

1. Menggunakan kabel udara dan kabel tanah, untuk tegangan rendah, tegangan menengah dan tegangan tinggi.
2. Menggunakan kabel udara untuk tegangan tinggi dan tegangan ekstra tinggi.

Suatu saluran transmisi udara dapat digambarkan sebagai untai (rangkai)an distribusi tetap seperti diperlihatkan pada gambar. Resistansi, induktansi, kapasitansi dan konduktansi bocor dari suatu rangkaian tertutup didistribusikan dengan seragam sepanjang saluran. Dalam gambar menyatakan induktansi dari penghantar saluran terhadap netral per unit panjang, R menyatakan resistansi arus bolak-balik dari penghantar saluran per unit panjang, C adalah kapasitansi dari penghantar

saluran terhadap netral per unit panjang, dan G adalah konduktansi bocor per unit panjang.



Gambar 2.2 Rangkaian Pengganti Saluran Transmisi

Untuk mempresentasikan saluran transmisi ke dalam bentuk rangkaian penggantinya, tergantung pada panjang saluran serta ketelitian yang diinginkan. Menurut Panjangnya dapat diklasifikasikan:

1. Saluran Transmisi Pendek (kurang dari 50 Mil)
2. Saluran Transmisi Menengah (50 - 150 Mil)
3. Saluran Transmisi Panjang (lebih dari 150 Mil)

Berdasarkan pemasangannya, saluran transmisi dibagi menjadi dua kategori, yaitu:

1. Saluran udara (*overhead lines*);

Saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada isolator antar menara atau tiang transmisi. Keuntungan dari saluran transmisi udara adalah lebih murah, mudah dalam perawatan, mudah dalam mengetahui letak gangguan, mudah dalam perbaikan, dan lainnya. Namun juga memiliki kerugian, antara lain: karena berada di ruang terbuka, maka cuaca sangat berpengaruh terhadap keandalannya, dengan kata lain mudah terjadi gangguan, seperti gangguan hubung singkat, gangguan tegangan lebih karena tersambar petir, dan gangguan-gangguan lainnya. Dari segi estetika/keindahan juga kurang, sehingga saluran transmisi bukan pilihan yang ideal untuk suatu saluran transmisi didalam kota.

2. Saluran kabel tanah (*underground cable*);

Saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang dipendam didalam tanah. Kategori saluran transmisi seperti ini adalah yang sering digunakan untuk pemasangan di dalam kota, karena berada didalam tanah, maka tidak mengganggu keindahan kota dan juga tidak mudah terjadi gangguan akibat kondisi cuaca atau kondisi alam. Namun juga

memilik kekurangan. Seperti: mahalnya biaya investasi dan sulitnya menentukan titik gangguan dan perbaikannya. Dalam dunia kelistrikan, dikenal dua kategori arus listrik, yaitu arus bolak-balik (*Alternating Current/AC*) dan arus searah (*Direct Current/DC*). Oleh karena itu, berdasarkan jenis arus listrik yang mengalir di saluran transmisi, maka saluran transmisi terdiri dari:

1. Saluran transmisi AC

Di dalam sistem AC, kenaikan dan penurunan tegangannya sangat mudah dilakukan dengan bantuan transformator dan juga memiliki 2 sistem, sistem fasa tunggal dan sistem fasa tiga sehingga saluran transmisi AC memiliki keuntungan lainnya, antara lain:

- daya yang disalurkan lebih besar
- nilai sesaatnya (*instantaneous value*) konstan, dan
- mempunyai medan magnet putar

Selain keuntungan-keuntungan yang disebutkan diatas, saluran transmisi AC juga memiliki kerugian, yaitu: tidak stabil, isolasi yang rumit dan mahal (mahal disini dalam artian untuk menyediakan suatu isolasi yang memang aman dan kuat)

2. Saluran transmisi DC

Dalam saluran transmisi DC, daya guna atau efisiensinya tinggi karena mempunyai faktor daya = 1, tidak memiliki masalah terhadap stabilitas terhadap sistem, sehingga dimungkinkan untuk penyaluran jarak jauh dan memiliki isolasi yang lebih sederhana.

Berhubungan dengan keuntungan dan kerugiannya, dewasa ini saluran transmisi di dunia sebagian besar menggunakan saluran transmisi AC. Saluran transmisi DC baru dapat dianggap ekonomis jika jarak saluran udaranya antara 400km sampai 600km, atau untuk saluran bawah tanah dengan panjang 50km. hal itu disebabkan karena biaya peralatan pengubah dari AC ke DC dan sebaliknya (*converter & inverter*) masih sangat mahal, sehingga dari segi ekonomisnya saluran AC akan tetap menjadi primadona dari saluran transmisi.

2.1.2. Saluran Distribusi

Sistem jaringan distribusi tenaga listrik merupakan bagian dari infrastruktur pengiriman sistem tenaga dimana energi listrik yang akan dikirim kepada pelanggan diambil dari tegangan tinggi transmisi. Pada umumnya sistem tenaga listrik mengandung beberapa unsur. Pertama, adanya suatu unsur pembangkit tenaga listrik. Tegangan dihasilkan oleh pusat tenaga listrik biasanya merupakan tegangan menengah (TM). Kedua, suatu sistem transmisi, lengkap dengan gardu induk yang pada umumnya menggunakan tegangan tinggi (TT), atau tegangan extra tinggi (TET). Ketiga, adanya saluran distribusi, yang biasanya terdiri atas saluran distribusi primer dengan tegangan menengah (TM) dan saluran distribusi sekunder dengan tegangan rendah (TR). Keempat, adanya tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai tegangan rendah, sedangkan pemakai besar seperti industri mempergunakan tegangan menengah atau tegangan tinggi.

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat-pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan.

Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-bebanyang ada di konsumen. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung akan dihubungkan kepada konsumen/pengguna tenaga listrik.

Di tepi-tepi jalan, biasanya berdekatan dengan persimpangan terdapat gardu-gardu distribusi (GD). Transformator distribusi mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah. Melalui tiang-tiang listrik yang terlihat di tepi jalan, tenaga listrik tegangan rendah disalurkan kepada konsumen. Di Indonesia, tegangan rendah adalah 220/380 volt, dan merupakan sistem distribusi sekunder.

Pada umumnya sistem distribusi tenaga listrik di Indonesia terdiri atas beberapa bagian, sebagai berikut:

1. Gardu Induk Distribusi (*Distribution Substation*):

GI akan menerima daya dari saluran transmisi kemudian menyalurkan melalui saluran distribusi primer menuju gardu distribusi dari 150kV menjadi 20kV.

2. Distribusi Primer:

Umumnya bertegangan tinggi (20 kV atau 6kV) yang disalurkan dari keluaran (outgoing) penyulang menuju pusat-pusat beban melalui SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah) dan SKTM (Saluran Kabel Tegangan Menengah).

3. Distribusi Sekunder:

Tegangan yang keluar (*outgoing*) dari distribusi primer diturunkan oleh transformator distribusi pada gardu distribusi menjadi tegangan rendah (220 dan 380 volt).

Tenaga yang dihasilkan pembangkit dan telah ditransmisikan belum dapat secara langsung digunakan oleh konsumen. Pada sisi ini tegangan diturunkan dari tegangan 150 kV maupun 500 kV menjadi tegangan distribusi sebesar 20 kV. Proses penurunan tegangan menggunakan trafo *stepdown*. Hal ini dilakukan di gardu induk. Selanjutnya tenaga listrik diturunkan kembali dari 20 kV menjadi tegangan 380/220 Volt, untuk digunakan ditempat konsumen melalui transformator tiang.

Pada beberapa konsumen industri mungkin saja tidak menggunakan 380/220 Volt. Disini akan disediakan transformator khusus untuk pelanggan industri. Hal ini karena beberapa mesin mereka menggunakan tegangan 6000 Volt misalnya.

2.1.3. Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan, misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

Untuk kepentingan yang sama didalam penggunaannya transformator dibedakan menjadi transformator daya, transformator distribusi, dan transformator ukur. Pada dasarnya ketiga peralatan transformator tersebut adalah sama, namun pada transformator ukur yang diutamakan adalah tegangan dan arusnya sedangkan transformator tenaga

adalah dayanya. Dengan demikian pada peralatan transformator ukur umumnya mempunyai kapasitas yang relatif rendah.

Transformator berdasarkan klasifikasinya dapat dibedakan menjadi:

1. Transformator Daya

Transformator daya merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk memindahkan daya dari satu rangkaian ke rangkaian yang lain pada tingkat tegangan yang berbeda. Pada umumnya suatu transformator disebut transformator daya, apabila daya yang dipindahkan melebihi 500 KVA atau bekerja pada sistem tegangan diatas 67 kV. Sesuai dengan fungsinya itu transformator daya ditempatkan dipusat-pusat pembangkit atau gardu induk. Di pusat pembangkit, transformator daya digunakan untuk menurunkan tegangan. Transformator daya yang digunakan pada gardu induk tegangan tinggi sekali (EHV) umumnya berupa tiga buah transformator 1 fasa. Penggunaan satu buah transformator 3 fasa sebenarnya lebih menguntungkan karena harganya lebih murah jika dibandingkan tiga buah transformator 1 fasa, memerlukan ruang yang lebih sedikit. Tetapi sukarnya pengangkutan yang disebabkan beratnya peralatan maka digunakan 3 buah transformator 1 fasa. Selama beroperasi, transformator daya akan mengeluarkan panas yang timbul dari inti besi dan lilitan tembaga. Agar tidak menimbulkan kerusakan pada transformator daya, maka diperlukan pendinginan. Berdasarkan pendinginannya, transformator daya digolongkan dalam dua jenis yaitu transformator daya yang tercelup dalam minyak (*oil imersed transformer*) dan transformator daya jenis kering (*dry type transformer*).

2. Transformator Distribusi

Trafo Distribusi adalah merupakan suatu komponen yang sangat penting dalam penyaluran tenaga listrik dari gardu distribusi ke konsumen. Kerusakan pada transformator distribusi menyebabkan kontinuitas pelayanan terhadap konsumen akan terganggu (terjadi pemutusan aliran listrik atau pemadaman). Pemadaman merupakan suatu kerugian yang menyebabkan biaya-biaya pembangkitan akan meningkat tergantung harga KWH yang tidak terjual. Pemilihan rating transformator Distribusi yang tidak sesuai dengan kebutuhan

beban akan menyebabkan efisiensi menjadi kecil, begitu juga penempatan lokasi transformator Distribusi yang tidak cocok mempengaruhi *drop* tegangan ujung pada konsumen atau jatuhnya/turunnya tegangan ujung saluran/konsumen.

Distribusi yang tepat, rating sesuai dengan kebutuhan beban akan menjaga tegangan jatuh pada konsumen dan akan menaikkan efisiensi penggunaan transformator distribusi. Jadi Transformator distribusi merupakan salah satu peralatan yang perlu dipelihara dan dipergunakan sebaik mungkin (seefisien mungkin), sehingga keandalan/kontinuitas pelayanan terhadap terjamin.

3. Transformator Ukur

Transformator ukur dipergunakan untuk menurunkan besaran-besaran ukur pada sisi primer menjadi harga yang lebih rendah pada sisi sekunder, sehingga dapat dipergunakan untuk keperluan pengukuran dan untuk keperluan relai pengaman. Terdapat 2 macam transformator ukur yang biasa digunakan adalah:

1. Transformator Tegangan (*Potential Transformer*)

Potential Transformer atau transformator tegangan berfungsi sebagai alat untuk menurunkan besar tegangan dari sisi primer ke sisi sekunder dan juga untuk mengisolasi bagian yang bertegangan tinggi sehingga besaran-besaran yang diukur berada pada pada sisi sekunder (tegangan rendah) dan sebagai standarisasi untuk masukan pada alat-alat ukur Volt meter MW MVAR KWH maupun sistem proteksi *distance* rele.

2. Transformator Arus (*Current Transformer*)

Current Transformer atau transformator arus ialah peralatan yang berfungsi sebagai peralatan untuk menurunkan besaran arus dari sisi primer ke sisi sekunder dari nilai yang besar ke nilai yang rendah dan juga untuk mengisolasi bagian yang bertegangan tinggi sehingga besaran-besaran yang diukur berada pada sisi sekunder (tegangan rendah) dan sebagai standarisasi untuk masukan pada alat-alat ukur amperemeter MW MVAR KWH maupun sistem proteksi

2.1.4. Kapasitor dan Reaktor *Shunt*

Dalam sistem tenaga listrik sering diperlukan kapasitor *shunt* dan reaktor *shunt* yang dipakai sebagai alat kompensasi pada saluran transmisi. Kompensasi diperlukan antara lain untuk memperbaiki tegangan agar variasi tegangan tetap berada pada batas-batas yang diizinkan

Pada kondisi kebutuhan daya aktif dan daya reaktif yang cukup besar maka tegangan cenderung menurun melewati batas yang diizinkan, Oleh sebab itu untuk mengatasi kondisi yang demikian maka dipasang kapasitor *shunt* yang dapat menyuplai daya reaktif sehingga tegangan dapat naik kembali. Sebaliknya bila kebutuhan daya aktif dan reaktif sangat kecil maka pengaruh dari kapasitor akan menyebabkan naiknya tegangan di sisi penerima, melewati batas yang diizinkan. Pemasangan reaktor *shunt* akan menyerap pelepasan muatan dari kapasitansi saluran sehingga tegangan turun kembali. Kapasitor dapat direpresentasikan sebagai sumber daya reaktif atau sering sebagai impedansi.

2.1.5. Beban (*Load*)

Ada tiga cara merepresentasikan beban dalam sistem tenaga listrik sebagai berikut:

1. Beban direpresentasikan sebagai daya konstan. Di sini daya nyata (MW) dan daya reaktif (MVAR) dianggap konstan. Representasi ini dipakai untuk studi aliran beban
2. Beban direpresentasikan sebagai arus konstan. Dalam hal ini arus beban dihitung sebagai berikut:

$$I = \frac{P - jQ}{V^*} = I \angle (\theta - \varphi) \quad (2.1)$$

Besaran skalar (magnitude) dari arus I dijaga agar tetap konstan.

3. Beban direpresentasikan sebagai impedansi konstan. Kondisi ini sering dipakai untuk merepresentasikan beban dalam studi stabilitas. Bila daya nyata (MW) dan reaktif (MVAR) diasumsikan diketahui dan menjaga agar besarnya (magnitude) tetap konstan maka impedansi Z dapat dihitung sebagai berikut:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{|V|^2}{P - jQ} \quad (2.2)$$

2.2. Analisa Aliran Daya

Analisa aliran daya merupakan studi yang dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya dan tegangan sistem dalam kondisi operasi. Informasi ini sangat dibutuhkan guna melakukan evaluasi untuk kerja sistem tenaga listrik. Hal lain yang dapat dilakukan adalah menemukan informasi tentang kondisi pembangkitan yang dilakukan. Analisa aliran daya ini berlaku pada informasi dalam kondisi normal dan darurat. Analisa aliran daya juga merupakan studi analisis dalam melakukan perencanaan suatu sistem pada sistem tenaga listrik. Perhitungan terhadap pembangkitan dan saluran menjadi sorotan utama. Dalam analisa aliran daya perhitungan dilakukan terhadap arus, tegangan, dan sudut pada sistem. Perhitungan yang dilakukan merupakan perhitungan non linear. Tegangan dan arus merupakan hubungan yang linear. Daya merupakan perhitungan yang tidak linear ketika melibatkan peubah dari tegangan dan arus.

Analisa aliran daya memerlukan permodelan dari representasi sistem tenaga listrik beserta komponen yang terdapat di dalamnya. Suatu sistem kelistrikan tiga fasa yang seimbang selalu diselesaikan per fasa dan digambarkan dalam diagram satu garis yang sesuai dengan sistem tersebut. Tujuan dari diagram satu garis adalah untuk memberikan semua informasi yang diperlukan. Dalam berbagai kasus, diagram satu garis berbeda-beda sesuai dengan persoalan yang akan diselesaikan. Dalam studi aliran daya, beban dan hambatan seperti impedansi, resistansi, dan induktansi harus digambarkan. Tempat netral ke tanah merupakan bagian yang perlukan digambarkan. Tujuan dari analisa aliran daya ini juga mempermudah dan menyederhanakan perhitungan yang kompleks bila dilakukan secara manual.

Analisa aliran daya meliputi juga perhitungan terhadap besar dan sudut fasa tegangan pada setiap bus. Dalam perhitungan dengan jelas dapat diketahui rugi daya saluran apabila daya aktif dan reaktif dari kedua bus diketahui.

Dalam melakukan perhitungan analisa aliran daya, mengacu ketentuan-ketentuan sebagai berikut:

1. Sistem yang dianalisa berada dalam keadaan seimbang untuk melakukan penyederhanaan perhitungan hingga menjadi satu fasa.
2. Satuan dasar yang berlaku untuk perhitungan ini dinyatakan dalam per unit untuk semua besaran yang ada. Dengan satuan per unit, perhitungan dapat dilakukan pada berbagai level tegangan selama dasar MVA yang sama

Bus-bus dalam rangkaian sistem tenaga merupakan simpul-simpul rangkaian yang biasa kita kenal dalam analisis rangkaian listrik. Bus-bus ini dapat dikelompokkan dalam beberapa jenis:

1. Bus-generator (generator bus), yaitu bus dimana generator dihubungkan melalui transformator. Daya yang masuk dari generator ke bus-generator ke- i (bus nomer i) dinyatakan sebagai:

$$S_{Gi} = P_{Gi} - jQ_{Gi} \quad (2.3)$$

Dari bus ke- i ini, daya mengalir ke dua jurusan; jurusan yang pertama adalah langsung ke beban (jika ada) yang terhubung ke bus ini dan yang kedua adalah menuju saluran transmisi di mana daya akan mengalir ke tempat lain yang jauh. Daya yang langsung menuju beban dinyatakan dengan:

$$S_{Gi} = P_{Gi} - jQ_{Gi} \quad (2.4)$$

sehingga daya yang menuju saluran transmisi di bus- i ini menjadi:

$$S_i = P_i + jQ_i = S_{Gi} - S_{Bi} \quad (2.5)$$

2. Bus-beban (*load bus*), yaitu bus yang tidak terhubung ke generator tetapi terhubung hanya ke beban. Dari bus-beban ke- j (nomor bus j) mengalir daya menuju ke beban sebesar S_{Bj} . Daya yang masuk ke bus beban ini berasal dari saluran transmisi, yang dapat kita katakan bahwa daya mengalir dari bus-beban menuju saluran transmisi tetapi dengan tanda negatif; jadi daya yang keluar dari bus-beban ke- j adalah sebesar

$$S_j = -S_{Bj} \quad (2.6)$$

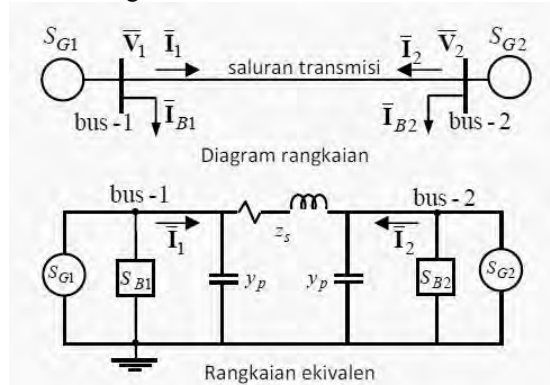
3. *Slack Bus* Pada tipe bus ini, mempunyai besaran dan sudut fasa yang tetap dan telah diberikan sebelumnya, pada bus ini berfungsi untuk mencatu rugi jaringan, kekurangan daya yang ada pada jaringan, dalam hal ini penting karena kekurangan daya tidak dapat dicapai kecuali terdapat suatu bus yang

mempunyai daya tak terbatas sehingga dapat mengimbangi rugi jaringan.

2.2.1. Persamaan Arus dan Tegangan

Persamaan aliran daya yang tidak linier sehingga harus diturunkan melalui persamaan arus dan tegangan karena persamaan arus dan tegangan ini merupakan persamaan linier. Pada bus generator terhubung generator ke bus melalui transformator. Karena dalam penurunan persamaan ini kita menggunakan sistem per-unit, maka impedansi transformator dapat disatukan dengan impedansi generator sehingga transformator tak perlu digambarkan lagi dalam diagram satu garis untuk analisis ini.

1. Sistem dengan dua bus



Gambar 2.3 Model Satu Fasa. Diagram dan Rangkaian Ekuivalen

Gambar 2.3 berikut ini memperlihatkan diagram satu garis dan model satu-fasa suatu sistem yang terdiri dari hanya dua bus; keduanya adalah bus generator, yaitu bus-1 dan bus-2. Kedua bus dihubungkan melalui saluran transmisi dan di masing-masing bus terhubung beban yang menarik arus I_{B1} dan I_{B2} .

S_{G1}, S_{G2} : Daya per fasa generator
 V_1, V_2 : Tegangan fasa netral
 I_1, I_2 : Arus ke saluran transmisi dari bus-1 ke bus-2
 I_{B1}, I_{B2} : Arus beban (langsung) dari bus-1 ke bus-2
 Z_{12} : Impedansi seri antar bus dalam rangkaian
 y_p : Admittansi paralel saluran transmisi rangkaian

Arus yang keluar dari bus-1 ke saluran transmisi adalah:

$$I_1 = y_p V_1 + y_{12}(V_1 - V_2) \quad (2.7)$$

$$I_1 = (y_p + y_{12})V_1 - y_{12}V_2 \quad (2.8)$$

Dengan persamaan admitansi merupakan kebalikan dari impedansi:

$$y_{12} = \frac{1}{Z_{12}} \quad (2.9)$$

Admitansi total yang dilihat oleh bus-1 didefinisikan sebagai:

$$Y_{11} = y_p + y_{12} \quad (2.10)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.10) ke persamaan (2.8) maka didapat persamaan sebagai berikut:

$$I_1 = Y_{11}V_1 - y_{12}V_2 \quad (2.11)$$

Dengan cara yang sama maka didapatkan juga persamaan arus pada bus-2:

$$I_2 = Y_{22}V_2 - y_{12}V_1 \quad (2.12)$$

2. Sistem dengan tiga bus

Dengan mempertimbangkan persamaan berikut:

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad (2.13)$$

mengembangkan persamaan (2.11) dan persamaan (2.12) dapat dikembangkan juga persamaan untuk penyelesaian sistem dengan tiga bus sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 \\ I_2 &= Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 \\ I_3 &= Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Persamaan (2.14) dapat dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

3. Sistem dengan n bus

Dari persamaan (2.15) dapat dikembangkan untuk menghitung sistem dengan n bus. Persamaan (2.15) dapat dikembangkan menjadi:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \cdots & Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

2.2.2. Persamaan Aliran Daya

Persamaan aliran daya dapat kita turunkan dengan memperhatikan arus yang mengalir ke saluran transmisi di setiap bus (tidak termasuk arus ke beban langsung). Untuk bus ke- i dalam sistem dengan n bus, kita dapatkan

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.17)$$

Dengan persamaan (2.17) dapat dihitung daya dari bus- i yang menuju saluran transmisi, yaitu:

$$S_i = V_i I_i^* = P_i + jQ_i \quad (2.18)$$

$$S_i = V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij}^* V_j^* \quad (2.19)$$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}; \theta_{ij} = \text{sudut antara bus } i \text{ dan bus } j \quad (2.20)$$

$$V_j = |V_j| \angle \varphi_j; \varphi_j = \text{sudut fasa tegangan di bus } j \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} S_i = & |V_i| \sum_{j=1}^n Y_{ij}^* V_j^* \cos(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i) \\ & + j |V_i| \sum_{j=1}^n Y_{ij}^* V_j^* \sin(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i) \end{aligned} \quad (2.22)$$

Dari persamaan (2.18) maka persamaan (2.22) dapat dipecah menjadi berikut:

$$\begin{aligned} P_i + jQ_i = & |V_i| \sum_{j=1}^n Y_{ij}^* V_j^* \cos(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i) \\ & + j |V_i| \sum_{j=1}^n Y_{ij}^* V_j^* \sin(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i) \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$P_i = |V| \sum_{j=1}^n Y_i V_j \cos(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i) \quad (2.24)$$

$$Q_i = -|V| \sum_{j=1}^n Y_i V_j \sin(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i) \quad (2.25)$$

Berdasarkan persamaan (2.5) , persamaan (2.24) dan persamaan (2.25) dapat dipecah lagi menjadi:

$$P_{Gi} - P_{Bi} = |V| \sum_{j=1}^n Y_i V_j \cos(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i) \quad (2.26)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Bi} = -|V| \sum_{j=1}^n Y_i V_j \sin(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i) \quad (2.27)$$

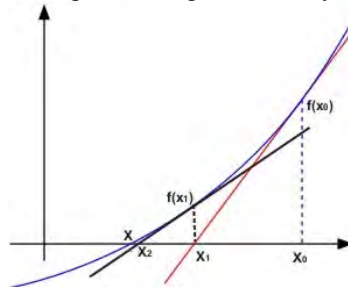
Persamaan (2.26) dan Persamaan (2.27) adalah dua persamaan yang kita peroleh untuk setiap bus- i . Dalam persamaan ini terdapat enam besaran peubah yang terkait dengan bus yang bersangkutan, yaitu:

$$P_{Gi}, Q_{Gi}, P_{Bi}, Q_{Bi}, V_j, \text{ dan } \varphi_j \quad (2.28)$$

Besaran yang lain adalah peubah di luar bus- i .

2.3. Metode *Newton Raphson*

Metode *Newton-Raphson* adalah metode pencarian akar suatu fungsi $f(x)$ dengan pendekatan satu titik, dimana fungsi $f(x)$ mempunyai turunan. Metode ini dianggap lebih mudah dari Metode Bagi-Dua (*Bisection Method*) karena metode ini menggunakan pendekatan satu titik sebagai titik awal. Semakin dekat titik awal yang kita pilih dengan akar sebenarnya, maka semakin cepat konvergen ke akarnya.



Gambar 2.4 Kurva Persamaan Garis

Prosedur perhitungan menggunakan Metode *Newton Raphson*:

1. Menentukan X_0 sebagai titik awal
2. Menarik garis lurus (misal garis l) yang menyinggung titik $f(X_0)$. Hal ini berakibat garis l memotong sumbu $-X$ di titik X_1 .
3. Ulangi langkah sebelumnya tapi sekarang X_1 dianggap sebagai titik awalnya.
4. Dari mengulang langkah-langkah sebelumnya akan mendapatkan X_2, X_3, \dots, X_n dengan X_n yang diperoleh adalah bilangan riil yang merupakan akar atau mendekati akar yang sebenarnya.

Dari gambar (2.4) dapat diturunkan persamaan dasar dari metode *Newton Raphson*. Persamaan umum garis adalah sebagai berikut:

$$Y - Y_0 = m(X - X_0) \quad (2.29)$$

$$Y - f(X_0) = f'(X_0)(X - X_0) \quad (2.30)$$

X_1 adalah perpotongan garis l dengan sumbu $-X$

$$0 - f(X_0) = f'(X_0)(X_1 - X_0) \quad (2.31)$$

$Y = 0$ dan $X = X_1$ maka koordinat titik $(X_1, 0)$

$$\frac{-f(X_0)}{f'(X_0)} = (X_1 - X_0) \quad (2.32)$$

Sehingga nilai X_1 didapatkan dan akan menjadi nilai awal pada perhitungan selanjutnya. Persamaan sebagai berikut:

$$X_1 = X_0 - \frac{f(X_0)}{f'(X_0)} \quad (2.33)$$

$$X_2 = X_1 - \frac{f(X_1)}{f'(X_1)} \quad (2.34)$$

Dari persamaan diatas dapat diturunkan persamaan umum Metode *Newton Raphson* sebagai berikut:

$$X_n = X_{n-1} - \frac{f(X_{n-1})}{f'(X_{n-1})} \text{ untuk } n = 1, 2, 3, 4, \dots, n \quad (2.35)$$

2.3.1. Penyelesaian Aliran Daya

Persamaan (2.26) dan persamaan (2.27) merupakan persamaan nonlinier, yang memiliki besaran tegangan dalam satuan per unit (pu) dan sudut dalam radian.

Dengan menggunakan deret *Taylor*, maka akan didapatkan rumus sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \varphi_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \varphi_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \varphi_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \varphi_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \varphi_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \varphi_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Proses penurunan dari persamaan (2.36) diberikan pada persamaan (2.37) sampai dengan persamaan (2.46). Differensiasi dari P_i terhadap φ_i ditunjukkan pada persamaan (2.37) dan persamaan (2.38) sebagai berikut:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \varphi_i} = \frac{\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i)}{\partial \varphi_i} \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \varphi_i} = -\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i) \quad (2.38)$$

Penurunan dari P_i terhadap V_i ditunjukkan pada persamaan (2.39), persamaan (2.40) dan persamaan (2.41) sebagai berikut:

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = \frac{\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i)}{\partial V_i} \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = \frac{\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i|^2 \cos(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i)}{\partial V_i} \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2 \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| \cos(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i) \quad (2.41)$$

Penurunan dari Q_i terhadap φ_i ditunjukkan pada persamaan (2.42) dan persamaan (2.43) sebagai berikut:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \varphi_i} = \frac{-\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i)}{\partial \varphi_i} \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \varphi_i} = -\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i) \quad (2.43)$$

Penurunan dari Q_i terhadap φ_i ditunjukkan pada persamaan (2.44), persamaan (2.45) dan persamaan (2.46) sebagai berikut:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \frac{-\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i)}{\partial V_i} \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \frac{-\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i|^2 \sin(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i)}{\partial V_i} \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = -2 \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| \sin(\theta_{ij} + \varphi_j - \varphi_i) \quad (2.46)$$

Hasil dari proses penurunan pada persamaan (2.38), persamaan (2.41), persamaan (2.43), dan persamaan (2.46) akan dipergunakan pada perhitungan aliran daya metode *Newton Rhapson*.

2.4. Optimal Power Flow

Optimal Power Flow (OPF) merupakan studi aliran daya yang mempelajari pengaturan yang optimal dalam sistem tenaga listrik. OPF pertama kali diusulkan oleh Carpentier pada tahun 1962 dan telah melalui waktu yang panjang untuk membentuk metode penyelesaian permasalahan aliran daya yang dapat diaplikasikan pada saat ini.

Peran utama OPF adalah untuk menentukan pengaturan yang optimal pada jaringan sistem tenaga listrik. OPF mengoptimisasikan fungsi-fungsi objektif yang menjadi permodelan masalah dalam sistem tenaga listrik seperti fungsi total biaya pembangkitan (*Economic Dispatch*), fungsi rugi jaringan, fungsi emisi pembangkitan, dan fungsi deviasi tegangan pada tiap bus dengan memperhatikan batasan-batasan yang terdapat pada operasi pada peralatan.

Secara umum, fungsi OPF dapat dituliskan dalam persamaan (2.47):

$$\begin{aligned} &\min j(x, u) \\ &\text{subject to : } g(x, u) \\ &h(x, u) \leq 0 \end{aligned} \quad (2.47)$$

$$x = [\theta, V_L, P_{gslack}, Q_g]^T \quad (2.48)$$

$$u = [P_g, V_g, t, B_{sh}]^T \quad (2.49)$$

Keterangan parameter pada persamaan (2.47), persamaan (2.48), dan persamaan (2.49):

$f = (x, u)$: Fungsi objektif
$g = (x, u)$: Merepresentasikan persamaan daya aktif dan reaktif
$h = (x, u)$: <i>Security Limit</i>
x	: Vektor variabel dependen
u	: Vektor variabel independen
V_L	: Voltage magnitude dari bus beban
P_G	: Daya aktif pembangkitan
P_{gslack}	: Daya aktif pembangkitan
Q_G	: Daya reaktif pembangkitan
V_G	: Tegangan pada bus generator
t	: Rasio tap transformer
V_g	: Tegangan pada bus generator

2.5. Fungsi Objektif

Pada Multi Objektif Optimal Power Flow terdapat beberapa fungsi objektif yang digunakan, diantaranya:

1. Fungsi biaya pembangkitan
2. Fungsi rugi jaringan

2.5.1. Fungsi Biaya Pembangkitan

Fungsi biaya pembangkitan merupakan permodelan fungsi secara matematis yang untuk dioptimasi. Persamaan fungsi objektif untuk biaya pembangkitan merupakan fungsi non-linear.

Fungsi biaya pembangkitan yang minimum diberikan pada persamaan (2.50) dan persamaan (2.51):

$$F = \sum_{i=1}^{Ng} F_i(P_i) \quad (2.50)$$

$$F(P_g) = \sum_{i=1}^{Ng} a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2 \quad (2.51)$$

Keterangan parameter persamaan (2.50) dan persamaan (2.51):

F	:	Total biaya pembangkitan
$F(P_i)$:	Biaya pembangkitan dari pembangkit ke- i yang merupakan fungsi dari output daya pembangkitan
N_g	:	Jumlah dari unit pembangkit
a_i, b_i, c_i	:	Koefisien dari biaya pembangkit

2.5.2. Fungsi Rugi Jaringan

Pada fungsi rugi jaringan merupakan permodelan matematis untuk mencari nilai rugi jaringan pada sistem tenaga listrik. Fungsi rugi jaringan merupakan persamaan non-linear.

Fungsi rugi jaringan (*losses*) pada permasalahan OPF diberikan dalam persamaan (2.52). Persamaan (2.53) merupakan persamaan keseimbangan antara *losses*, daya pembangkitan, dan daya yang diserap beban.

$$P_{Load} + P_{Losses} - \sum P_i = 0 \quad (2.52)$$

$$P_{Losses} = \sum_{k=1}^{NI} g_k \left[(t_k V_i)^2 + V_j^2 + 2t_k V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j) \right] \quad (2.53)$$

Keterangan parameter persamaan (2.52) dan persamaan (2.53):

P_{load}	:	Daya beban total
P_{losses}	:	Rugi daya total
$\sum P_i$:	Daya pembangkitan

2.6. Aplikasi Optimal Power Flow

Fleksibilitas dari Optimal Power Flow memberikan banyak bidang aplikasi:

1. Memberikan perhitungan pembangkitan yang optimum dengan banyak variabel yang dikontrol, yang bertujuan untuk meminimisasikan biaya pembangkitan dengan memperhitungkan limit dari sistem transmisi.

2. Di dalam perhitungan *short-term load forecasting*, OPF menyediakan *preventative dispatch* jika *security constraint* diperhitungkan.
3. OPF memberikan *corrective dispatch* yang dapat membantu operator untuk menala sistem sehingga mampu untuk mengurangi *overload* maupun batas tegangan yang tidak diijinkan.
4. OPF mampu digunakan secara periodik untuk menemukan pengaturan yang optimum pada tegangan pembangkitan, tap transformator, dan static VAR kompensator.
5. OPF mampu menghitung aliran daya maksimum yang akan ditransfer ke area lain, sehingga OPF dapat digunakan juga dalam penentuan tekanan (*stress*) maksimum dalam perencanaan sistem transmisi sehingga sistem dapat bertahan.
6. OPF digunakan untuk analisa ekonomi dari sistem tenaga dengan menyediakan *Bus Incremental Cost* (BICs). BICs digunakan untuk menghitung marginal cost dari daya pada bus sistem.

2.7. Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle swarm optimization (PSO) merupakan metode metaheuristik yang terinspirasi dari pola tingkah laku kawanan burung dan kawan ikan dalam mencari mangsa. Arti *swarm* maksudnya adalah individu yang bergerombol seperti pada kelompok burung atau ikan. Algoritma ini diajukan oleh Eberhart dan Kennedy. *Particle Swarm Optimization* pertama kali dimunculkan pada tahun 1995, sejak saat itulah para peneliti banyak menurunkan dan mengembangkan metode PSO.

Serupa dengan Algoritma Genetika, PSO terdiri dari populasi yang cerdas di dalam ruang pencarian yang diberikan. PSO tersusun oleh partikel bergerak dalam ruang pencarian. Individu partikel di dalam PSO memiliki posisi dan kecepatan. PSO tidak memiliki persilangan antara individu dan tidak memiliki mutasi, dan partikel yang ada tidak yang diganti oleh partikel lain selama menjalani proses pencarian. PSO dalam pencarian solusi dilakukan dengan menarik partikel menuju posisi dengan solusi yang baik. Setiap partikel menyimpan posisi terbaiknya selama proses pencarian. Posisi tersebut biasa disebut sebagai (P_{bi}) *Personal*

Best dan Posisi terbaik biasa disebut dengan (P_{gbi}) *Global Best*. Posisi dan kecepatan akan diperbarui dengan persamaan matematis.

$$V_i^t = wV_i^{t-1} + C_1 \times r_1 \times (P_{bi}^{t-1} + X_i^{t-1}) + C_2 \times r_2 \times (P_{gbi}^{t-1} + X_i^{t-1}) \quad (2.54)$$

$$X_i^t = X_i^{t-1} + V_i^t \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_D \quad (2.55)$$

Keterangan dari persamaan (2.54) dan (2.55):

w : Faktor pembobot (*inertia weight*)

C_1, C_2 : Koefisien akselerasi

N_D : Dimesi dari permasalahan yang diptimasi

r_1, r_2 : Bilangan acak terdistribusi antara 0 sampai 1

X : Posisi Partikel

V_i : Kecepatan pada dimensi ke i

PSO memiliki beberapa kunci keunggulan dibandingkan dengan algoritma optimasi yang konvensional diantaranya:

1. Hanya memerlukan persamaan fungsi fitness untuk mengukur kualitas dari solusi terhadap persamaan matematis yang kompleks seperti gradient, hessian, atau, matriks inversi. Hal ini mereduksi kompleksitas dari komputasi dan meringankan beberapa batasan yang terjadi pada persamaan fungsi objektif yang bersifat *differentiability*, *continuity*, atau *convexity*.
2. Lebih sensitif untuk menemukan solusi awal dalam sebuah pencarian.
3. Bisa dengan mudah diintegrasikan dengan metode optimasi lainnya (*hybrid form*).
4. Memiliki kemampuan untuk terbebas dari lokal optimum dalam menemukan solusi terbaik lainnya sesuai dengan aturan probabilitas.

Dalam perbandingan dengan algoritma metaheuristik lainnya PSO memiliki bagian yang bisa disorot diantaranya:

1. PSO bisa dipogram dan dimodifikasi sesuai dengan matematika dasar dan operasi logika.
2. PSO menggunakan memori dan waktu komputasi yang bisa diatur
3. PSO memiliki sedikit parameter untuk di tuning.

Versi sederhana dari PSO memungkinkan setiap gerakan individu dari suatu titik ke titik baru dengan menggunakan kombinasi pembobot dari posisi individu terbaik yang pernah ditemukan dan posisi terbaik dari

tiap individu. Pilihan parameter algoritma PSO (*inertia weight*) tampaknya menjadi sangat penting untuk kecepatan dan efisiensi dalam komputasi algoritma

2.8. Algoritma Serigala

Algoritma Serigala diadaptasi dari optimisasi Serigala Abu-abu (GWO). GWO yang pertama diusulkan oleh Mirjalili et al., Algoritma ini terinspirasi oleh perilaku demokratis dan mekanisme berburu serigala abu-abu di alam liar. Dalam sebuah grup, Serigala Abu-abu memiliki hirarki yang dominan sosial yang sangat ketat. Para pemimpin, yang laki-laki dan perempuan, yang disebut *alpha*. Tingkat kedua serigala abu-abu, yang merupakan serigala bawahan yang membantu para pemimpin, yang disebut *beta*. Tingkat ketiga dari serigala abu-abu adalah *delta*, yang harus tunduk pada *alpha* dan *beta*, namun mendominasi *omega*. Peringkat terendah dari Serigala Abu-abu adalah *omega*, yang harus tunduk pada semua serigala dominan lainnya.

Algoritma Serigala memiliki model matematika sebagai berikut:

1. Hirarki Sosial: Dalam hirarki sosial serigala saat merancang segerombolan serigala, solusi terbaik dianggap sebagai *alpha* (α), kedua dan ketiga solusi terbaik dianggap sebagai *beta* (β) dan *delta* (δ) masing-masing. Sisa solusi calon diasumsikan *omega* (ω). Serigala ω dipandu oleh α , β , dan δ , dan diikuti oleh tiga serigala.
2. Melingkari mangsa: Serigala mengelilingi mangsanya selama berburu. Perilaku mengelilingi dapat dimodelkan secara matematis sebagai berikut:

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (2.56)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2.57)$$

Dimana iterasi saat ini, adalah vektor koefisien, adalah vektor posisi serigala abu-abu. Vektor dan dihitung sebagai berikut:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (2.58)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (2.59)$$

Dimana komponen yang linear menurun 2-0 sesuai dengan iterasi dan iterasi, merupakan vektor acak dalam [0, 1].

3. Berburu: berburu biasanya dipandu oleh alpha, betha dan delta, yang memiliki pengetahuan yang lebih baik tentang lokasi potensi mangsa. Agen pencari lainnya harus memperbarui posisi mereka sesuai dengan posisi agen pencari terbaik. Update posisi agen mereka dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\bar{D}_\alpha = |\bar{C}_1 \cdot \bar{X}_\alpha - \bar{X}| \quad (2.60)$$

$$\bar{D}_\beta = |\bar{C}_2 \cdot \bar{X}_\beta - \bar{X}| \quad (2.61)$$

$$\bar{D}_\delta = |\bar{C}_3 \cdot \bar{X}_\delta - \bar{X}| \quad (2.62)$$

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_\alpha - \bar{A}_1 \cdot (\bar{D}_\alpha) \quad (2.63)$$

$$\bar{X}_2 = \bar{X}_\beta - \bar{A}_2 \cdot (\bar{D}_\beta) \quad (2.64)$$

$$\bar{X}_3 = \bar{X}_\delta - \bar{A}_3 \cdot (\bar{D}_\delta) \quad (2.65)$$

$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3} \quad (2.66)$$

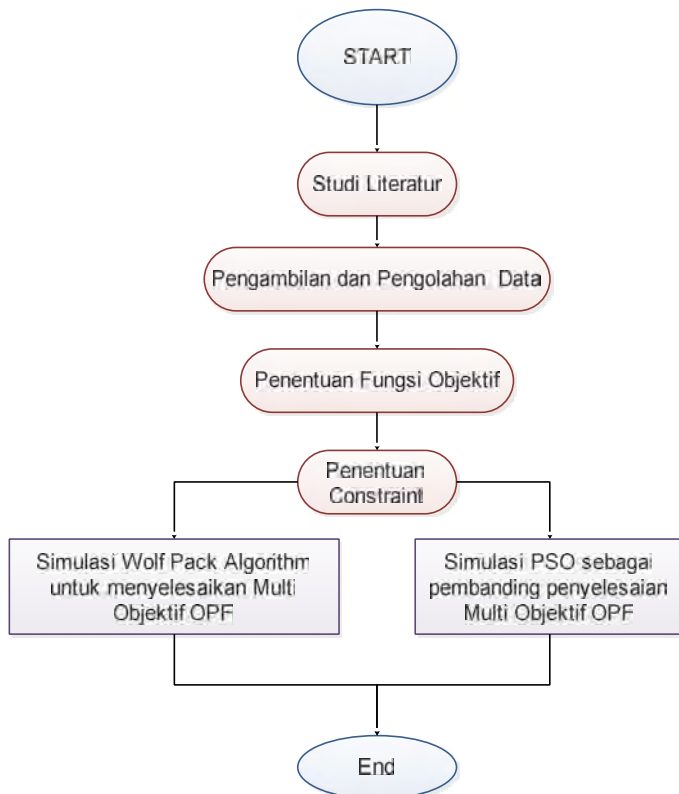
4. Menyerang mangsa dan mencari mangsa (eksploitasi dan eksplorasi): Mangsa diserang oleh serigala abu-abu adalah kemampuan serigala abu-abu menangkap mangsa. Dengan kata lain, kemampuan serigala abu-abu bisa mengakibatkan optima global; itu adalah kemampuan eksploitasi. Karena nilai yaitu menurun 2-0, juga mengalami penurunan sebesar. Dengan kata lain, adalah nilai acak dalam interval. Ketika, serigala dipaksa untuk menyerang mangsanya. Di sisi lain, mencari mangsa oleh serigala abu-abu adalah kemampuan serigala abu-abu dalam mencari berbagai posisi mangsa. Dengan kata lain, mencari mangsa adalah kemampuan eksplorasi. Nilai-nilai acak yang digunakan untuk mewajibkan agen pencari untuk menyimpang dari mangsa. Ketika serigala abu-abu terpaksa menyimpang dari mangsanya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Perencanaan Penelitian

Terdapat beberapa tahapan yang dilalui dalam menyelesaikan penelitian Optimal Power Flow (OPF) yang menggunakan metode Algoritma Serigala pada sistem tenaga listrik yang akan digambarkan pada diagram penelitian OPF pada Gambar 3.1 Flowchart tahap-tahap penelitian Optimal Power Flow sebagai berikut:



Gambar 3.1 Flowchart Tahap-tahap Penelitian Optimal Power Flow

3.2. Studi Literatur

Dalam penelitian Tugas Akhir ini, Diperlukan Studi literatur terkait Multi Objektif Optimal Power Flow. Sumber literatur dapat diperoleh dari berbagai sumber. Sumber literatur yang diperlukan meliputi jurnal serta buku – buku teks yang relevan dengan permasalahan terkait. Studi yang dilakukan dimulai dari tingkat dasar hingga tingkat lanjut. Materi terkait tentang studi literatur yang dilakukan meliputi:

1. Buku teks yang berhubungan dengan masalah Optimal Power Flow dan penyelesaian permasalahan Optimal Power Flow [1, 2, 3, 4, 5].
2. Jurnal dan teks yang berkaitan dengan Multi Objective Optimal Power Flow [6, 7, 8, 9].
3. Jurnal yang berkaitan dengan Algoritma Serigala [10, 11, 12].
4. Jurnal dan teks yang berkaitan dengan Particle Swarm Optimization [13, 14, 15].

3.3. Pengelolaan Data

Pada penelitian Tugas Akhir ini, Data yang diperlukan untuk melakukan simulasi multi objektif OPF adalah data dari test standart IEEE 30 bus yang terdiri oleh:

1. Data daya pembangkitan yang terdapat pada IEEE 30 Bus
2. Data daya beban yang terdapat pada IEEE 30 Bus
3. Data impedansi saluran yang terdapat pada IEEE 30 Bus
4. Data karakteristik dispatch pembangkit yang terdapat pada IEEE 30 Bus

Data – data tersebut diproses untuk analisa aliran daya dalam penentuan biaya pembangkitan yang paling optimal dan minimisasi rugi pembangkitan sistem tenaga listrik.

3.4. Penentuan Fungsi Objektif

Pada Tugas Akhir ini fungsi objektif terkait permasalahan OPF bersifat non linear, dalam penelitian ini digunakan *multi objective function* sebagai berikut:

3.4.1. Fungsi Rugi Jaringan

Rugi pada jaringan di seluruh sistem diberikan dalam fungsi sebagai berikut:

$$P_L = \sum_{k=1}^{NI} P_{losses} \quad (3.1)$$

$$P_{losses} = \sum_{k=1}^{NI} g_k \left[(t_k V_i)^2 + V_j^2 + 2t_k V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j) \right] \quad (3.2)$$

Keterangan parameter pada persamaan (3.1) dan persamaan (3.2):

V_i dan V_j	: Voltage magnitudes pada bus i dan bus j
NI	: Jumlah cabang
g_k	: Konduktansi pada branch k
t_k	: Tap trafo yang terhubung pada branch k
θ_i dan θ_j	: Sudut tegangan pada bus i dan bus j

3.4.2. Fungsi Biaya Pembangkitan

Fungsi biaya pembangkitan diberikan pada persamaan kuadrat sebagai berikut:

$$F(P_g) = \sum_{i=1}^{Ng} a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2 \quad (3.3)$$

Keterangan parameter pada persamaan (3.3):

N_g	: Jumlah generator
a_i, b_i, c_i	: Koefisien biaya pada generator
P_{gi}	: Daya aktif yang dihasilkan generator

3.5. Penentuan Konstrain

3.5.1. Konstrain Kapasitas Pembangkit

Untuk kestabilan operasional, daya aktif masing – masing pembangkit dibatasi oleh batasan atas pembangkitan dan batasan bawah pembangkitan sebagai berikut:

$$P_{G1}^{min} \leq P_{G1} \leq P_{G1}^{max} \quad (3.4)$$

$$P_{G2}^{min} \leq P_{G2} \leq P_{G2}^{max} \quad (3.5)$$

$$P_{G3}^{min} \leq P_{G3} \leq P_{G3}^{max} \quad (3.6)$$

$$P_{G4}^{min} \leq P_{G4} \leq P_{G4}^{max} \quad (3.7)$$

$$P_{G5}^{min} \leq P_{G5} \leq P_{G5}^{max} \quad (3.8)$$

$$P_{G6}^{min} \leq P_{G6} \leq P_{G6}^{max} \quad (3.9)$$

Batasan pembangkitan daya reaktif pada masing – masing pembangkit sebagai berikut:

$$Q_{G1}^{min} \leq Q_{G1} \leq Q_{G1}^{max} \quad (3.10)$$

$$Q_{G2}^{min} \leq Q_{G2} \leq Q_{G2}^{max} \quad (3.11)$$

$$Q_{G3}^{min} \leq Q_{G3} \leq Q_{G3}^{max} \quad (3.12)$$

$$Q_{G4}^{min} \leq Q_{G4} \leq Q_{G4}^{max} \quad (3.13)$$

$$Q_{G5}^{min} \leq Q_{G5} \leq Q_{G5}^{max} \quad (3.14)$$

$$Q_{G6}^{min} \leq Q_{G6} \leq Q_{G6}^{max} \quad (3.15)$$

Batasan masing-masing *shunt* capasitor sebagai berikut:

$$Q_{shunt\ 1}^{min} \leq Q_{shunt\ 1} \leq Q_{shunt\ 1}^{max} \quad (3.16)$$

$$Q_{shunt\ 2}^{min} \leq Q_{shunt\ 2} \leq Q_{shunt\ 2}^{max} \quad (3.17)$$

$$Q_{shunt\ 3}^{min} \leq Q_{shunt\ 3} \leq Q_{shunt\ 3}^{max} \quad (3.18)$$

$$Q_{shunt\ 4}^{min} \leq Q_{shunt\ 4} \leq Q_{shunt\ 4}^{max} \quad (3.19)$$

$$Q_{shunt\ 5}^{min} \leq Q_{shunt\ 5} \leq Q_{shunt\ 5}^{max} \quad (3.20)$$

Keterangan parameter persamaan (3.4) sampai dengan persamaan (3.20):

P_{Gi}^{min}	: Daya aktif pembangkitan minimum (MW)
P_{Gi}^{max}	: Daya aktif pembangkitan maksimum (MW)
Q_{Gi}^{min}	: Daya reaktif pembangkitan minimum (MVAR)
Q_{Gi}^{max}	: Daya reaktif pembangkitan maksimum (MVAR)
$Q_{shunt\ i}^{min}$: Batasan minimum <i>shunt capacitor</i> (MVAR)
$Q_{shunt\ i}^{max}$: Batasan maksimum <i>shunt capacitor</i> (MVAR)

3.5.2. Keseimbangan Aliran Daya

Daya total yang dibangkitkan harus sesuai dengan daya total beban yang diserap dan rugi pada jaringan transmisi. Persamaannya diberikan sebagai berikut:

$$\sum_{i=1}^N P_{Gi} - P_{Load} - P_{losses} = 0 \quad (3.21)$$

Keterangan parameter pada persamaan (3.21):

P_{Load}	: Total beban (MW)
P_{losses}	: Total losses (MW)

3.6. Multi Objektif OPF Menggunakan *Weighted Sum Method*

Weighted sum method merupakan metode pembobotan yang digunakan untuk mengubah optimasi multi objektif menjadi bentuk optimasi satu fungsi objektif dengan cara perkalian masing – masing fungsi objektif dengan koefisien *weight*. Nilai *weight* dari masing – masing fungsi objektif merupakan nilai yang diasumsikan terhadap proporsi relatif dari masing – masing fungsi objektif.

Bentuk umum kombinasi dari fungsi multi objektif yang digunakan sebagai berikut:

$$F = w_1 f_1 + w_2 f_2 \quad (3.22)$$

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (3.23)$$

Penalty factor untuk masing-masing fungsi objektif dipertimbangkan di dalam persamaan berikut:

$$F = w_1 \alpha f_1 + w_2 \beta f_2 \quad (3.24)$$

$$\alpha = \frac{f_{ref \max}}{f_{1 \min}} \quad (3.25)$$

$$\beta = \frac{f_{ref \max}}{f_{2 \min}} \quad (3.26)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (3.1) dan persamaan (3.3) ke persamaan (3.25) dan persamaan (3.26), maka akan didapatkan nilai masing – masing *penalty factor* sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{f_{ref \max}}{\left(\sum_{k=1}^{NI} P_{losses} \right)_{\max}} \quad (3.27)$$

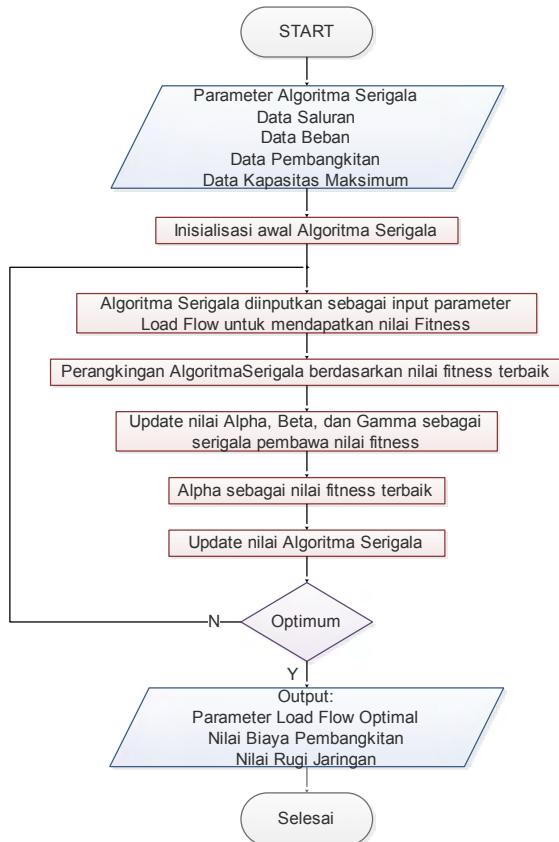
$$\beta = \frac{f_{ref \max}}{\left(\sum_{i=1}^{Ng} a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2 \right)_{\max}} \quad (3.28)$$

Keterangan parameter persamaan (3.22) sampai dengan persamaan (3.28):

F	: Fungsi multi objektif
w_1	: <i>Weight objective function 1</i>
α	: Faktor normalisasi <i>objective function 1</i>
f_1	: <i>Objective function 1</i>
w_2	: <i>Weight objective function 2</i>
β	: Faktor normalisasi <i>objective function 2</i>
f_2	: <i>Objective function 2</i>

3.7. Simulasi Algoritma Serigala untuk Menyelesaikan Multi Objektif OPF

Dalam penyelesaian Tugas Akhir digunakan simulasi Algoritma Serigala sebagai metode utama dalam menyelesaikan permasalahan multi objektif OPF. *Flowchart* penyelesaian OPF dengan menggunakan Algoritma Serigala diberikan pada



Gambar 3.2 Flowchart Penyelesaian OPF Menggunakan Algoritma Serigala

Pada bagian ini metode penyelesaian menggunakan Algoritma Serigala untuk mencari kombinasi dari parameter-parameter pembangkitan yang optimal. Algoritma Serigala merupakan salah satu teknik heuristic yang memiliki kemampuan menyelesaikan permasalahan *non-linear*, *non-differentiable*, dan *multinodal objective function*. Algoritma Serigala memuat n (banyak) Serigala, masing-masing serigala memuat nilai variabel yang akan dituning.

3.7.1. Inisialisasi Awal Algoritma Serigala

Pada proses inisialisasi ini, populasi serigala ditentukan dan dibangkitkan secara acak diantara range batas atas dan batas bawah yang diijinkan. Pada permasalahan OPF yang sederhana, populasi yang dibangkitkan mewakili variabel daya aktif (P). Pada OPF kompleks, populasi yang dibangkitkan mewakili variabel daya aktif masing-masing pembangkit, tegangan pada masing-masing pembangkit, tap trafo, dan *shunt capacitor*.

Pada proses inisialisasi pembatasan Algoritma Serigala sesuai dengan konstrain batasan atas dan batasan bawah yang diberikan sebagai berikut:

$$P_{ij}^k = \begin{cases} P_{ij}^k & \text{if } P_{ij \min}^k \leq P_{ij}^k \leq P_{ij \max}^k \\ P_{ij \min}^k & \text{if } P_{ij}^k < P_{ij \min}^k \\ P_{ij \max}^k & \text{if } P_{ij}^k > P_{ij \max}^k \end{cases} \quad (3.29)$$

Metode ini akan menghasilkan Serigala yang memiliki *range* yang memenuhi *equality constrain* dan *inequality constrain*. Jika terdapat individu Serigala yang memiliki titik operasi kurang dari titik operasi minimum yang diijinkan akan diset pada titik minimum yang diijinkan. Jika terdapat individu Serigala yang memiliki titik operasi melebihi titik operasi maksimum yang diijinkan akan diset pada titik maksimum dari operasi yang diijinkan.

3.7.2. Pergerakan Serigala

Nilai pembawa terbaik akan diklasifikasikan berdasarkan *alpha*, *beta*, dan *omega*. Posisi dan Jarak tiap serigala dibidang *cartecius* akan diperoleh dan diupdate dari persamaan berikut:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \quad \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \quad (3.30)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}|$$

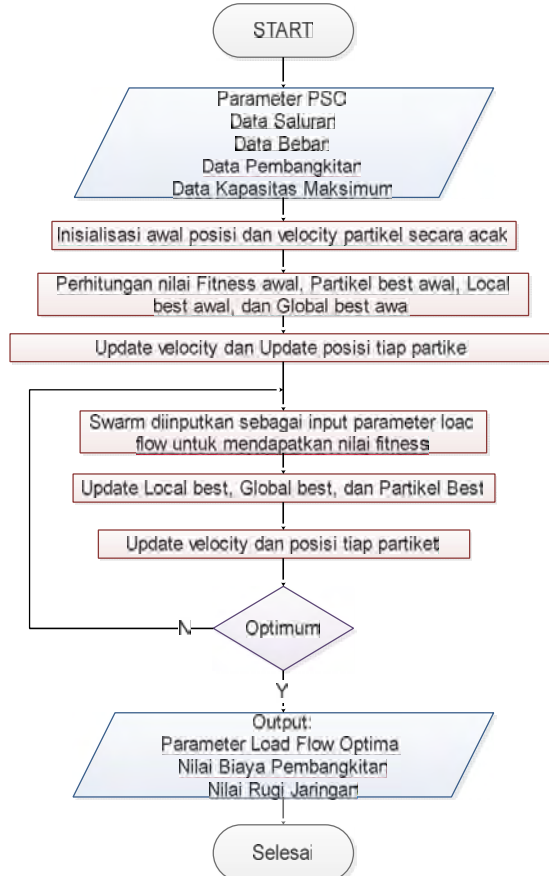
$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \quad \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta) \quad (3.31)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (3.32)$$

3.8. Simulasi Algoritma Particle Swarm Optimization untuk Menyelesaikan Multi Objektif OPF

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini dilakukan simulasi *Particle Swarm Optimization* (PSO) sebagai metode pembanding dalam menyelesaikan permasalahan multi objektif OPF. *Flowchart* penyelesaian OPF dengan menggunakan PSO diberikan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Flowchart Penyelesaian OPF Menggunakan PSO

3.8.1. Perhitungan Nilai Fitness Awal

Nilai acak awal partikel yang diinputkan pada *load flow* metode Newton Rhapsod untuk mendapatkan nilai fitness awal. Nilai *Personal Best* awal akan disimpan dan dibandingkan dengan nilai pada iterasi berikutnya. Nilai fitness terbaik yang didapatkan dari proses ini akan diset sebagai *Global Best* awal. Fungsi utama dari nilai inisialisasi awal adalah sebagai nilai pembanding untuk proses iterasi berikutnya

3.8.2. Update *Velocity* dan Posisi Partikel

Persamaan yang akan digunakan untuk update *velocity* sebagai berikut:

$$V_i^t = wV_i^{t-1} + C_1 \times r_1 \times (P_{bi}^{t-1} + X_i^{t-1}) + C_2 \times r_2 \times (P_{gbi}^{t-1} + X_i^{t-1}) \quad (3.33)$$

Persamaan yang akan digunakan untuk update posisi sebagai berikut:

$$X_i^t = X_i^{t-1} + V_i^t \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_D \quad (3.34)$$

3.8.3. Update *Personal best* dan *Global Best*

Pada setiap iterasi, *Pbest* dari setiap partikel dimodifikasi menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Pbest_{ij}^{k+1} = X_{ij}^{k+1} \text{ if } TC_i^{k+1} < TC_i^k \quad (3.35)$$

$$Pbest_{ij}^{k+1} = Pbest_i^k \text{ if } TC_i^{k+1} \geq TC_i^k \quad (3.36)$$

Keterangan parameter pada persamaan di atas:

- X_{ij}^{k+1} : Posisi partikel i pada iterasi k+1
- TC_i^{k+1} : Fungsi objektif yang dievaluasi pada posisi partikel i
- $Pbest_{ij}^{k+1}$: Posisi terbaik individu i sampai iterasi k+1

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

Pada Tugas Akhir ini, penyelesaian permasalahan OPF akan disimulasikan untuk menentukan minimisasi biaya operasi pembangkit dan rugi jaringan pada sistem. Metode utama yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan multi objektif OPF adalah Algoritma Serigala (*Wolf Pack Algorithm*). Metode pembandingan yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan OPF pada Tugas Akhir ini adalah *Particle Swarm Optimization* (PSO).

Simulasi yang dikerjakan pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Simulasi OPF menggunakan satu fungsi objektif
 - Simulasi *Economic Dispatch*
 - Simulasi *Power Loss Minimization*
2. Simulasi OPF menggunakan fungsi multi objektif
 - Simulasi *Economic Power Loss Minimization*

4.1. Data IEEE 30 Bus

Dalam Tugas Akhir ini digunakan sistem standar IEEE 30 bus yang terdiri dari 6 unit pembangkit yang berada pada bus 1, bus 2, bus 5, bus 11, dan bus 13. Tabel 4.1 menyajikan data sistem standar IEEE 30 Bus.

Tabel 4.1 Data IEEE 30 Bus

Bus	Bus	Voltage	Angle	Load		Generator				Static MVAR
No	Code	Mag.	Degree	MW	MVAR	MW	MVAR	Qmin	Qmax	+Qc/-Qc
1	1	1.06	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1.043	0	21.7	12.7	40	0	-40	50	0
3	0	1	0	2.4	1.2	0	0	0	0	0
4	0	1.06	0	7.6	1.6	0	0	0	0	0
5	2	1.01	0	94.2	19	0	0	-40	40	0
6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	0	22.8	10.9	0	0	0	0	0
8	2	1.01	0	30	30	0	0	-30	40	0
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1	0	5.8	2	0	0	-6	24	0
11	2	1.082	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	1	0	11.2	7.5	0	0	0	0	0
13	2	1.071	0	0	0	0	0	-6	24	0
14	0	1	0	6.2	1.6	0	0	0	0	0
15	0	1	0	8.2	2.5	0	0	0	0	0
16	0	1	0	3.5	1.8	0	0	0	0	0
17	0	1	0	9	5.8	0	0	0	0	0
18	0	1	0	3.2	0.9	0	0	0	0	0
19	0	1	0	9.5	3.4	0	0	0	0	0
20	0	1	0	2.2	0.7	0	0	0	0	0
21	0	1	0	17.5	11.2	0	0	0	0	0
22	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	1	0	3.2	1.6	0	0	0	0	0
24	0	1	0	8.7	6.7	0	0	0	0	0
25	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	1	0	3.5	2.3	0	0	0	0	0
27	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	1	0	2.4	0.9	0	0	0	0	0
30	0	1	0	10.6	1.9	0	0	0	0	0

Tabel 4.2 Data Saluran IEEE 30 Bus

Bus nl	Bus nr	R pu	X pu	$\frac{1}{2} B$ pu	Tap Setting
1	2	0.0192	0.0575	0.0264	1
1	3	0.0452	0.1852	0.0204	1
2	4	0.057	0.1737	0.0184	1
3	4	0.0132	0.0379	0.0042	1
2	5	0.0472	0.1983	0.0209	1
2	6	0.0581	0.1763	0.0187	1
4	6	0.0119	0.0414	0.0045	1
5	7	0.046	0.116	0.0102	1
6	7	0.0267	0.082	0.0085	1
6	8	0.012	0.042	0.0045	1
6	9	0	0.208	0.97	1
6	10	0	0.556	0.96	1
9	11	0	0.208	0	1
9	10	0	0.11	0	1
4	12	0	0.256	0.93	1
12	13	0	0.14	0	1
12	14	0.1231	0.2559	0	1
12	15	0.0662	0.1304	0	1
12	16	0.0945	0.1987	0	1
14	15	0.221	0.1997	0	1
16	17	0.0824	0.1923	0	1
15	18	0.1073	0.2185	0	1
18	19	0.0639	0.1292	0	1
19	20	0.034	0.068	0	1
10	20	0.0936	0.209	0	1
10	17	0.0324	0.0845	0	1
10	21	0.0348	0.0749	0	1
10	22	0.0727	0.1499	0	1
21	22	0.0116	0.0236	0	1
15	23	0.1	0.202	0	1
22	24	0.115	0.179	0	1
23	24	0.132	0.27	0	1
24	25	0.1885	0.3292	0	1
25	26	0.2544	0.38	0	1
25	27	0.1093	0.2087	0	1
28	27	0	0.396	0.96	1
27	29	0.2198	0.4153	0	1
27	30	0.3202	0.6027	0	1
29	30	0.2399	0.4533	0	1
8	28	0.0636	0.2	0.0214	1
6	28	0.0169	0.0599	0.065	1

Batasan kemampuan pembangkitan daya aktif dan reaktif dari masing-masing pembangkit pada sistem IEEE 30 Bus ditunjukkan pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Data Generator IEEE 30 Bus

No	Pembangkit	Daya Aktif (MW)		Daya Reaktif (MVAR)	
		Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
1	Pembangkit 1	50	200	-20	200
2	Pembangkit 2	20	80	-20	100
3	Pembangkit 3	15	50	-15	80
4	Pembangkit 4	10	35	-10	60
5	Pembangkit 5	10	30	-10	50
6	Pembangkit 6	12	40	-10	60

Batasan kemampuan *Capacitor Bank* ditunjukkan pada Tabel 4.4 berikut:

Tabel 4.4 Data *Capasitor Bank* IEEE 30 Bus

No	Capasior Bank	Minimum	Maksimum
		MW	MW
1	Capasitor Bank 1 (Bus 10)	2	5
2	Capacitor Bank 2 (Bus 12)	2	5
3	Capasitor Bank 3 (Bus 15)	2	5
4	Capacitor Bank 4 (Bus 17)	2	5
5	Capasitor Bank 5 (Bus 20)	2	5
6	Capacitor Bank 6 (Bus 21)	2	5
7	Capasitor Bank 7 (Bus 23)	2	5
8	Capacitor Bank 8 (Bus 24)	2	5
9	Capasitor Bank 9 (Bus 29)	2	5

Tabel 4.5 Data Tap Setting Trafo IEEE 30 Bus

No	Tap Trafo	Tap Setting (pu)	
		Minimum	Maksimum
1	Tap Trafo 1	0.95	1.1
2	Tap Trafo 2	0.95	1.1
3	Tap Trafo 3	0.95	1.1
4	Tap Trafo 4	0.95	1.1

Pada batasan kemampuan tap setting trafo ditunjukkan pada tabel 4.5 mulai dari 0.95 pu hingga 1.1 pu.

Persamaan karakteristik biaya pembangkitan pada masing-masing pembangkit sistem IEEE 30 Bus ditunjukkan pada Tabel 4.6 berikut:

Tabel 4.6 Data Fungsi Biaya Pembangkit Sistem IEEE 30 Bus

No	Pembangkit	Fungsi Biaya (\$/Jam)
1	Pembangkit 1 (Bus 1)	$C_1 = 0.00375P_1^2 + 2P_1 + 0$
2	Pembangkit 2 (Bus 2)	$C_2 = 0.0175P_2^2 + 1.75P_2 + 0$
3	Pembangkit 3 (Bus 5)	$C_3 = 0.0625P_3^2 + P_3 + 0$
4	Pembangkit 4 (Bus 8)	$C_4 = 0.00834P_4^2 + 3.25P_4 + 0$
5	Pembangkit 5 (Bus 11)	$C_5 = 0.025P_5^2 + 3P_5 + 0$
6	Pembangkit 6 (Bus 13)	$C_6 = 0.025P_6^2 + 3P_6 + 0$

Dalam melakukan simulasi, komputer yang digunakan memiliki spesifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 4.7 berikut:

Tabel 4.7 Data Spesifikasi CPU

No	Parameter	Spesifikasi CPU
1	Processor	Intel®Core™ i5
2	Speed Processing	2.93 GHz
3	Installed Memory (RAM)	3.37 GB
4	System Type	64 Bit Operating System

4.2. Parameter Kecerdasan Buatan

Pada Tugas Akhir ini penggunaan parameter yang dipakai untuk menyelesaikan permasalahan fungsi objektif digunakan secara konsisten pada simulasi yang dilakukan. Jumlah iterasi menunjukkan jumlah evaluasi yang dilakukan untuk mencapai nilai konvergensi dari fungsi objektif yang diujikan.

4.2.1. Particle Swarm Optimization

Pada tabel 4.8 dibawah ini menunjukan parameter yang digunakan pada simulasi menggunakan PSO. Parameter yang diatur dalam PSO diantaranya meliputi jumlah iterasi, jumlah *swarm*, nilai C1, dan nilai C2 sebagai berikut:

Tabel 4.8 Parameter PSO

Parameter	Value
Iteration	100
Swarm	20
C1 (Minimum)	0.15
C2 (Maksimum)	3

4.2.2. Algoritma Serigala

Pada tabel 4.9 dibawah ini menunjukan parameter yang digunakan pada simulasi menggunakan Algoritma Serigala. Parameter yang diatur dalam PSO diantaranya meliputi jumlah iterasi, jumlah serigala, dan nilai *a* sebagai berikut:

Tabel 4.9 Parameter Algoritma Serigala

Parameter	Value
Iteration	100
Population	20
<i>a</i>	2

4.3. Simulasi OPF Menggunakan Satu Fungsi Objektif

Optimal Power Flow akan disimulasikan menggunakan satu program utama dan program pembanding yaitu Algoritma Serigala (*Wolf Pack Algorithm*) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) pada penyelesaian masalah satu fungsi objektif.

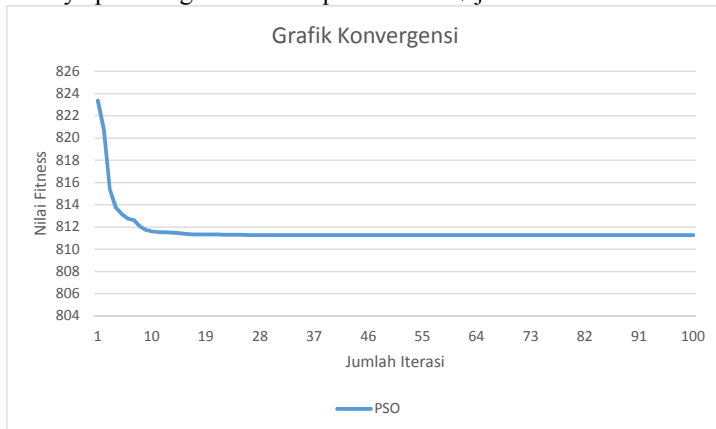
4.3.1. *Economic Dispatch*

Simulasi OPF satu fungsi objektif *Economic Dispatch* bertujuan untuk meminimalisasi biaya pembangkitan yang dihasilkan generator secara simultan. Simulasi OPF *Economic Dispatch* akan diselesaikan menggunakan Algoritma Serigala dan *Particle Swarm Optimization*.

4.3.1.1. *Particle Swarm Optimization*

Simulasi *Economic Dispatch* akan menghasilkan daya aktif masing-masing pembangkit dan akan diinputkan pada penyelesaian aliran daya metode *Newton Raphson*.

Daya aktif dan biaya pembangkitan hasil simulasi OPF sistem IEEE 30 bus menggunakan metode PSO ditunjukkan pada tabel 4.8. Pada simulasi OPF, PSO konvergen dengan nilai fitness sebesar 811.275, total daya aktif sebesar 294.950 MW, total rugi mencapai 11.550 MW, dan total biaya pembangkitan mencapai 811.275 \$/jam.



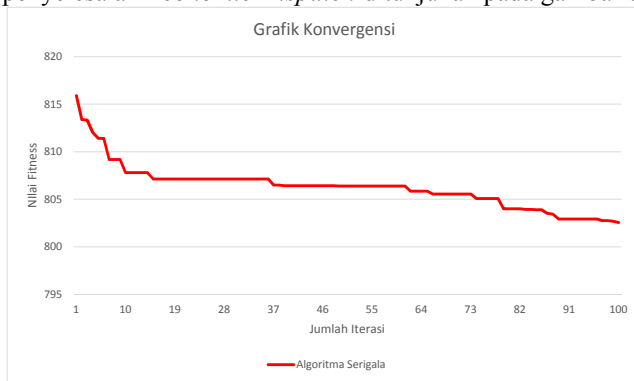
Gambar 4.1 Grafik Konvergensi Biaya Pembangkitan PSO

Tabel 4.10 Daya Aktif, Biaya Pembangkitan, dan Rugi Hasil Simulasi OPF

No	Generator	Daya (MW)	Biaya (\$/Jam)	Rugi (MW)
1	Power Generation 1	175.604	466.847	11.550
2	Power Generation 2	49.037	127.895	
3	Power Generation 3	23.067	56.324	
4	Power Generation 4	16.300	55.190	
5	Power Generation 5	13.345	44.488	
6	Power Generation 6	17.597	60.532	
	Total	294.950	811.275	11.550

4.3.1.2. Algoritma Serigala

Simulasi *Economic Dispatch* akan menghasilkan daya aktif masing-masing pembangkit dan akan diinputkan pada penyelesaian aliran daya metode *Newton Raphson*. Grafik konvergensi Algoritma Serigala untuk penyelesaian *Economic Dispatch* ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 4.2 Grafik Konvergensi Biaya Pembangkitan Algoritma Serigala

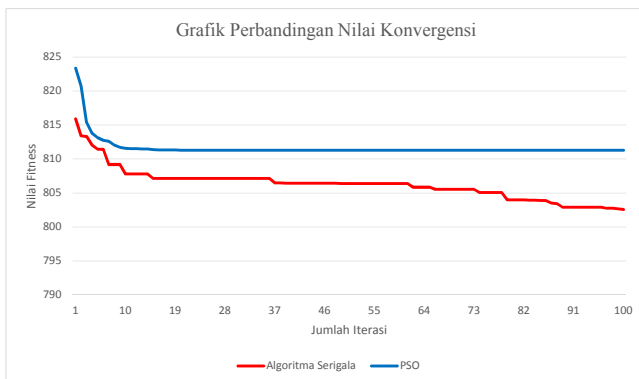
Daya aktif dan biaya pembangkitan hasil simulasi OPF sistem IEEE 30 bus menggunakan metode Algoritma Serigala ditunjukkan pada tabel 4.8. Pada simulasi OPF, Algoritma Serigala konvergen dengan nilai

fitness sebesar 802.555, total daya aktif sebesar 293.010 MW, total rugi mencapai 9.713 MW, dan total biaya pembangkitan mencapai 802.636 \$/jam.

Tabel 4.11 Daya Aktif, Biaya Pembangkitan, dan Rugi Hasil Simulasi OPF

No	Generator	Daya (MW)	Biaya (\$/Jam)	Rugi (MW)
1	Power Generation 1	176.637	470.275	9.713
2	Power Generation 2	49.486	129.456	
3	Power Generation 3	21.012	48.607	
4	Power Generation 4	21.281	72.939	
5	Power Generation 5	11.722	38.600	
6	Power Generation 6	12.872	42.759	
	Total	293.010	802.636	9.713

4.3.1.3. Perbandingan Algoritma Serigala dan PSO



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Konvergensi Satu Fungsi Objektif

Gambar 4.3 menunjukkan hasil grafik konvergensi OPF menggunakan metode Algoritma Serigala dan PSO pada sistem IEEE 30 bus pada optimisasi satu fungsi objektif OPF. Dari kedua metode

penyelesaian OPF *Economic Dispatch*, nilai fitness terkecil dihasilkan oleh metode Algoritma Serigala sebesar 802.555.

Tabel 4.12 Perbandingan Hasil Simulasi *Economic Dispatch*

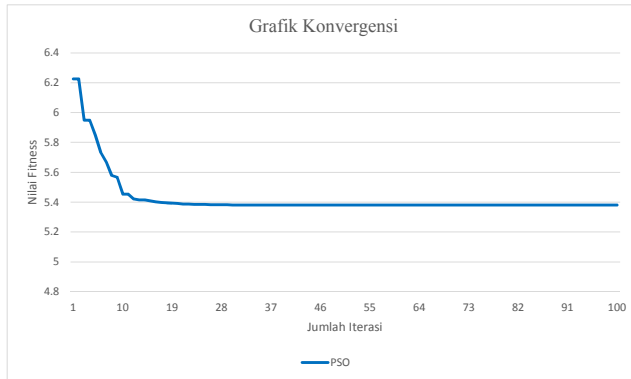
Metode	Nilai Konvergensi Terbaik	Power Loss (MW)	Biaya Total Pembangkitan (\$/Jam)
Algoritma Serigala	802.555	9.713	802.636
PSO	811.275	11.550	811.275

4.3.2. *Power Loss Minimization*

Simulasi OPF satu fungsi objektif *Power Loss Minimization* bertujuan untuk meminimisasi rugi jaringan pada sistem. Simulasi OPF *Power Loss Minimization* akan diselesaikan menggunakan Algoritma Serigala dan *Particle Swarm Optimization*.

4.3.2.1. *Particle Swarm Optimization*

Simulasi *Power Loss Minimization* akan menghasilkan daya aktif masing-masing pembangkit dan akan diinputkan pada penyelesaian aliran daya metode Newton Raphson. Grafik konvergensi PSO untuk penyelesaian *Power Loss Minimization* ditunjukan pada gambar berikut:



Gambar 4.4 Grafik Konvergensi Rugi Jaringan PSO

Daya aktif dan biaya pembangkitan hasil simulasi OPF sistem IEEE 30 bus menggunakan metode PSO ditunjukkan pada tabel 4.8. Pada simulasi OPF, PSO konvergen dengan nilai fitness sebesar 5.381, total daya aktif sebesar 288.781 MW, total rugi mencapai 5.381 MW, dan total biaya pembangkitan mencapai 883.835 \$/jam.

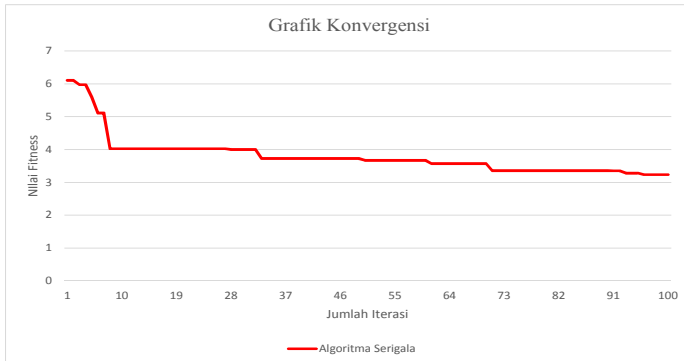
Tabel 4.13 Daya Aktif, Biaya Pembangkitan, dan Rugi Hasil Simulasi OPF

No	Generator	Daya (MW)	Biaya (\$/Jam)	Rugi (MW)
1	Power Generation 1	87.778	204.450	5.381
2	Power Generation 2	82.396	263.003	
3	Power Generation 3	31.919	95.596	
4	Power Generation 4	33.433	117.978	
5	Power Generation 5	14.306	48.033	
6	Power Generation 6	38.950	154.776	
	Total	288.781	883.835	5.381

4.3.2.2. Algoritma Serigala

Simulasi *Power Loss Minimization* akan menghasilkan daya aktif masing-masing pembangkit dan akan diinputkan pada penyelesaian aliran

daya metode *Newton Raphson*. Grafik konvergensi Algoritma Serigala untuk penyelesaian *Power Loss Minimization* ditunjukan pada gambar berikut:



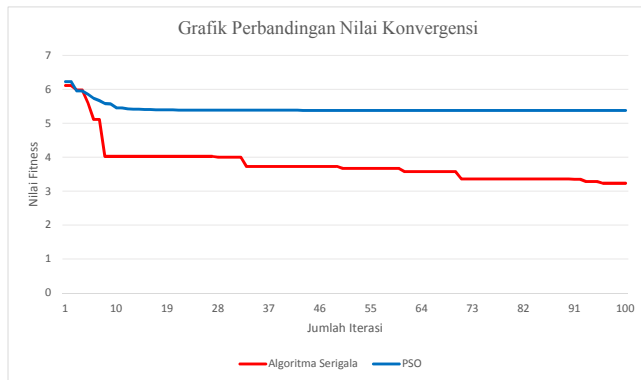
Gambar 4.5 Grafik Konvergensi Rugi Jaringan Algoritma Serigala

Daya aktif dan biaya pembangkitan hasil simulasi OPF sistem IEEE 30 bus menggunakan metode Algoritma Serigala ditunjukkan pada tabel 4.11. Pada simulasi OPF, Algoritma Serigala konvergen dengan nilai fitness sebesar 3.233, total daya aktif sebesar 286.663 MW, total rugi mencapai 3.511 MW, dan total biaya pembangkitan mencapai 956.359 \$/jam.

Tabel 4.14 Daya Aktif, Biaya Pembangkitan, dan Rugi Hasil Simulasi OPF

No	Generator	Daya (MW)	Biaya (\$/Jam)	Rugi (MW)
1	Power Generation 1	56.444	124.836	3.511
2	Power Generation 2	78.893	246.983	
3	Power Generation 3	50.000	206.250	
4	Power Generation 4	35.000	123.967	
5	Power Generation 5	30.000	112.500	
6	Power Generation 6	36.296	141.823	
	Total	286.633	956.359	3.511

4.3.2.3. Perbandingan Algoritma Serigala dan PSO



Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Konvergensi Satu Fungsi Objektif

Gambar 4.6 menunjukkan hasil grafik konvergensi OPF menggunakan metode Algoritma Serigala dan PSO pada sistem IEEE 30 bus pada optimisasi satu fungsi objektif OPF. Dari kedua metode penyelesaian OPF *Power Loss Minimization*, nilai fitness terkecil dihasilkan oleh metode Algoritma Serigala sebesar 3.233.

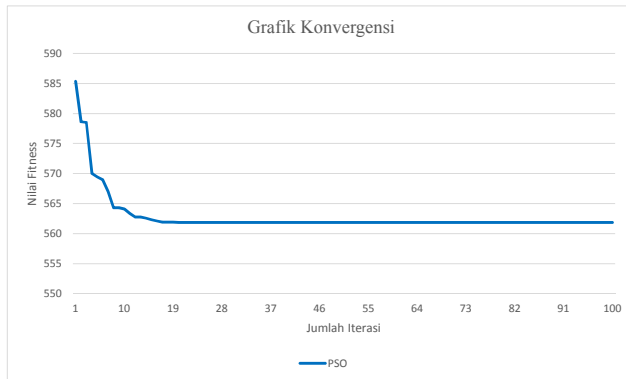
Tabel 4.15 Perbandingan Hasil Simulasi *Power Loss Minimization*

Metode	Nilai Konvergensi Terbaik	Power Loss (MW)	Biaya Total Pembangkitan (\$/Jam)
Algoritma Serigala	3.233	3.511	956.359
PSO	5.381	5.381	883.835

4.4. Simulasi OPF Menggunakan Fungsi Multi Objektif

Simulasi *Economic Power Loss Minimization* bertujuan untuk meminimalisasi biaya pembangkitan dan rugi jaringan secara simultan. Simulasi *Economic Power Loss Minimization* akan diselesaikan menggunakan metode Algoritma Serigala dan PSO.

4.4.1. Particle Swarm Optimization



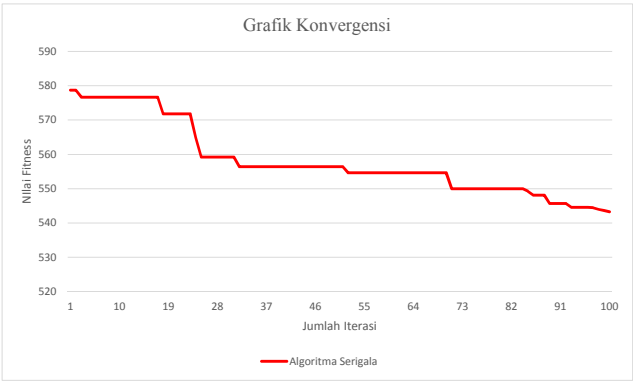
Gambar 4.7 Grafik Konvergensi *Economic Power Loss Minimization* PSO

Daya aktif dan biaya pembangkitan hasil simulasi OPF sistem IEEE 30 bus menggunakan metode PSO ditunjukkan pada tabel 4.8. Pada simulasi OPF, PSO konvergen dengan nilai fitness sebesar 561.835, total daya aktif sebesar 289.348 MW, total rugi mencapai 5.948 MW, dan total biaya pembangkitan mencapai 834.908 \$/jam.

Tabel 4.16 Daya aktif, biaya pembangkitan, dan rugi hasil simulasi OPF

No	Generator	Daya (MW)	Biaya (\$/Jam)	Losses (MW)
1	Power Generation 1	118.849	290.668	5.948
2	Power Generation 2	52.933	141.668	
3	Power Generation 3	30.495	88.617	
4	Power Generation 4	37.060	131.898	
5	Power Generation 5	21.099	74.428	
6	Power Generation 6	28.911	107.629	
	Total	289.348	834.908	5.948

4.4.2. Algoritma Serigala



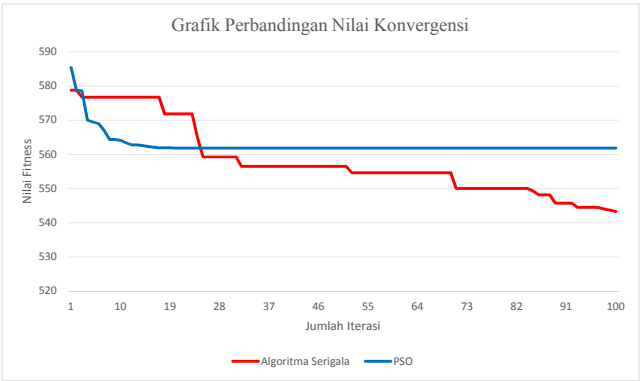
Gambar 4.8 Grafik Konvergensi *Economic Power Loss Minimization* Algoritma Serigala

Daya aktif dan biaya pembangkitan hasil simulasi OPF sistem IEEE 30 bus menggunakan metode Algoritma Serigala ditunjukkan pada tabel 4.17. Pada simulasi OPF, Algoritma Serigala konvergen dengan nilai fitness sebesar 543.285, total daya aktif sebesar 287.485 MW, total rugi mencapai 4.085 MW, dan total biaya pembangkitan mencapai 886.971 \$/jam.

Tabel 4.17 Daya Aktif, Biaya Pembangkitan, dan Rugi Hasil Simulasi OPF

No	Generator	Daya (MW)	Biaya (\$/Jam)	Rugi (MW)
1	Power Generation 1	87.380	203.393	4.085
2	Power Generation 2	61.146	172.436	
3	Power Generation 3	42.130	153.064	
4	Power Generation 4	34.252	121.104	
5	Power Generation 5	28.857	107.390	
6	Power Generation 6	33.720	129.584	
	Total	287.485	886.971	4.085

4.4.3. Perbandingan Algoritma Serigala dan PSO



Gambar 4.9 Perbandingan Grafik Konvergensi *Multi Objective OPF*

Gambar 4.9 menunjukkan hasil grafik konvergensi OPF menggunakan metode Algoritma Serigala dan PSO.pada sistem IEEE 30 bus pada optimisasi satu fungsi objektif OPF. Dari kedua metode penyelesaian OPF *Economic Power Loss Minimization*, nilai fitness terkecil dihasilkan oleh metode Algoritma Serigala sebesar 543.285.

Tabel 4.18 Perbandingan Hasil Simulasi *Economic Power Loss Minimization*

Metode	Nilai Konvergensi Terbaik	Power Loss (MW)	Biaya Total Pembangkitan (\$/Jam)
Algoritma Serigala	543.285	4.085	886.971
PSO	561.835	5.948	834.908

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Dalam simulasi OPF menggunakan satu fungsi objektif, nilai konvergensi Algoritma Serigala memberikan nilai fitness yang lebih baik dibandingkan dengan metode PSO. Nilai fitness Algoritma Serigala pada simulasi *Economic Dispatch* mencapai nilai fitness sebesar 802.555 sedangkan nilai fitness PSO sebesar 811.275.
2. Dalam simulasi OPF menggunakan satu fungsi objektif, nilai konvergensi Algoritma Serigala memberikan nilai total *losses* yang lebih baik dibandingkan dengan metode PSO. Nilai total *losses* Algoritma Serigala pada simulasi *Power Loss Minimization* mencapai nilai total rugi sebesar 3.233 sedangkan nilai total rugi PSO sebesar 5.381.
3. Dalam simulasi OPF dengan dua fungsi objektif, nilai konvergensi Algoritma Serigala memberikan nilai fitness yang lebih baik dibandingkan dengan metode PSO. Nilai fitness Algoritma Serigala pada simulasi *Economic Power Loss Minimization* mencapai nilai fitness sebesar 543.285 sedangkan nilai fitness PSO sebesar 561.835.
4. Algoritma Serigala merupakan metode yang lebih baik untuk menyelesaikan permasalahan optimisasi *multi objective* OPF dibandingkan dengan metode PSO.

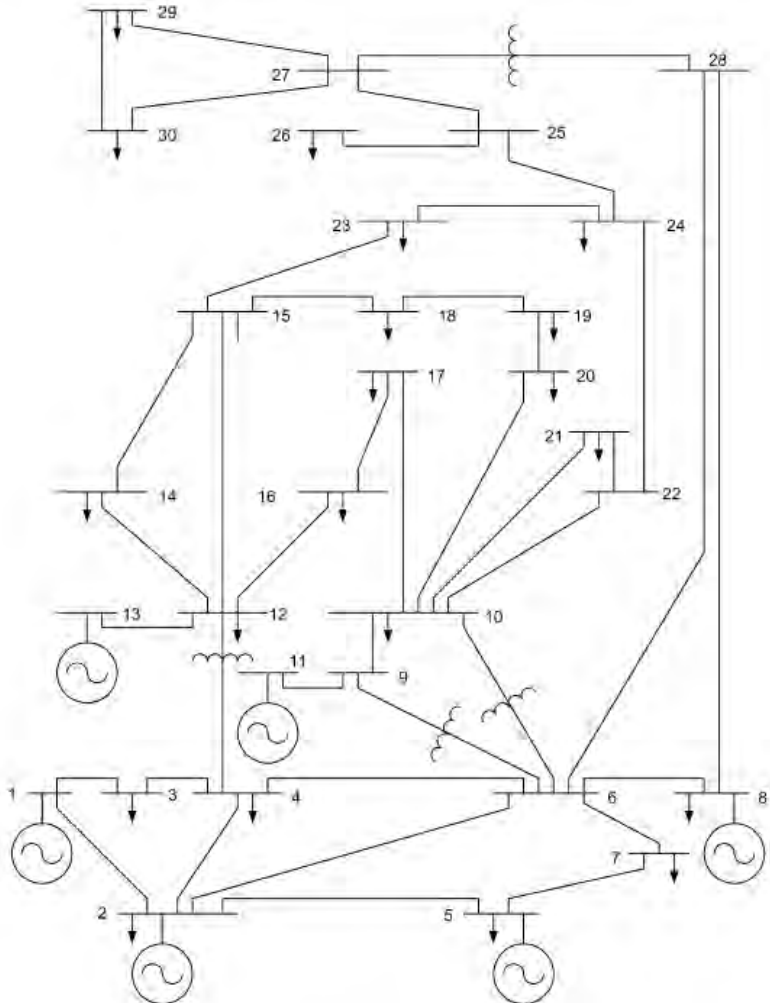
5.2. Saran

1. Penelitian ini bisa digunakan dan dikembangkan dalam sistem yang sesungguhnya berhubungan dengan Optimal Power Flow (OPF) dalam pengaturan sistem tenaga listrik.
2. Untuk penelitian multi objektif OPF perlu dikembangkan dengan penambahan batasan secara lebih kompleks sehingga dapat diimplementasikan pada *Dynamic OPF*.
3. Penelitian ini perlu dikembangkan lebih lanjut untuk meningkatkan kecepatan nilai konvergensi dari Algoritma Serigala dalam menyelesaikan permasalahan multi objektif.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

A. IEEE 30 Bus System



B. *Economic Dispatch*

Tabel.L.1 Daya Aktif, Tegangan Bus Generator, Tap Trafo, dan Shunt Capacitor Hasil Simulasi Algoritma Serigala dan PSO

No	Parameter	WPA	No	Parameter	PSO
1	Daya Pembangkitan 1 (MW)	176.090	1	Daya Pembangkitan 1 (MW)	196.908
2	Daya Pembangkitan 2 (MW)	49.486	2	Daya Pembangkitan 2 (MW)	49.037
3	Daya Pembangkitan 3 (MW)	21.012	3	Daya Pembangkitan 3 (MW)	23.067
4	Daya Pembangkitan 4 (MW)	21.281	4	Daya Pembangkitan 4 (MW)	16.300
5	Daya Pembangkitan 5 (MW)	11.722	5	Daya Pembangkitan 5 (MW)	13.345
6	Daya Pembangkitan 6 (MW)	12.872	6	Daya Pembangkitan 6 (MW)	17.597
7	Tegangan Generator 1 (pu)	1.050	7	Tegangan Generator 1 (pu)	0.976
8	Tegangan Generator 2 (pu)	1.060	8	Tegangan Generator 2 (pu)	1.034
9	Tegangan Generator 3 (pu)	1.059	9	Tegangan Generator 3 (pu)	1.009
10	Tegangan Generator 4 (pu)	1.046	10	Tegangan Generator 4 (pu)	1.039
11	Tegangan Generator 5 (pu)	1.020	11	Tegangan Generator 5 (pu)	0.970
12	Tegangan Generator 6 (pu)	1.095	12	Tegangan Generator 6 (pu)	1.010
13	Tap Trafo 1 (pu)	0.961	13	Tap Trafo 1 (pu)	1.060
14	Tap Trafo 2 (pu)	0.970	14	Tap Trafo 2 (pu)	1.051
15	Tap Trafo 3 (pu)	1.016	15	Tap Trafo 3 (pu)	1.018
16	Tap Trafo 4 (pu)	0.969	16	Tap Trafo 4 (pu)	1.046
17	Capacitor 1 (MW)	2.053	17	Capacitor 1 (MW)	2.798
18	Capacitor 2 (MW)	2.425	18	Capacitor 2 (MW)	3.323
19	Capacitor 3 (MW)	2.921	19	Capacitor 3 (MW)	3.190
20	Capacitor 4 (MW)	3.477	20	Capacitor 4 (MW)	4.318
21	Capacitor 5 (MW)	2.403	21	Capacitor 5 (MW)	3.615
22	Capacitor 6 (MW)	2.150	22	Capacitor 6 (MW)	3.137
23	Capacitor 7 (MW)	2.221	23	Capacitor 7 (MW)	3.666
24	Capacitor 8 (MW)	3.330	24	Capacitor 8 (MW)	4.610
25	Capacitor 9 (MW)	3.350	25	Capacitor 9 (MW)	3.746

C. Power Loss Minimization

Tabel.L.2 Daya Aktif, Tegangan Bus Generator, Tap Trafo, dan Shunt Capacitor Hasil Simulasi Algoritma Serigala dan PSO

No	Parameter	WPA	No	Parameter	PSO
1	Daya Pembangkitan 1 (MW)	76.761	1	Daya Pembangkitan 1 (MW)	131.080
2	Daya Pembangkitan 2 (MW)	78.893	2	Daya Pembangkitan 2 (MW)	82.396
3	Daya Pembangkitan 3 (MW)	50.000	3	Daya Pembangkitan 3 (MW)	31.919
4	Daya Pembangkitan 4 (MW)	35.000	4	Daya Pembangkitan 4 (MW)	33.433
5	Daya Pembangkitan 5 (MW)	30.000	5	Daya Pembangkitan 5 (MW)	14.306
6	Daya Pembangkitan 6 (MW)	36.296	6	Daya Pembangkitan 6 (MW)	38.950
7	Tegangan Generator 1 (pu)	1.050	7	Tegangan Generator 1 (pu)	1.050
8	Tegangan Generator 2 (pu)	1.035	8	Tegangan Generator 2 (pu)	0.994
9	Tegangan Generator 3 (pu)	1.028	9	Tegangan Generator 3 (pu)	1.007
10	Tegangan Generator 4 (pu)	1.059	10	Tegangan Generator 4 (pu)	1.010
11	Tegangan Generator 5 (pu)	1.100	11	Tegangan Generator 5 (pu)	1.093
12	Tegangan Generator 6 (pu)	1.100	12	Tegangan Generator 6 (pu)	1.078
13	Tap Trafo 1 (pu)	0.950	13	Tap Trafo 1 (pu)	1.076
14	Tap Trafo 2 (pu)	0.992	14	Tap Trafo 2 (pu)	0.985
15	Tap Trafo 3 (pu)	0.968	15	Tap Trafo 3 (pu)	1.070
16	Tap Trafo 4 (pu)	0.950	16	Tap Trafo 4 (pu)	1.031
17	Capacitor 1 (MW)	2.783	17	Capacitor 1 (MW)	2.947
18	Capacitor 2 (MW)	2.751	18	Capacitor 2 (MW)	2.653
19	Capacitor 3 (MW)	2.993	19	Capacitor 3 (MW)	3.823
20	Capacitor 4 (MW)	2.000	20	Capacitor 4 (MW)	4.879
21	Capacitor 5 (MW)	3.340	21	Capacitor 5 (MW)	2.085
22	Capacitor 6 (MW)	2.825	22	Capacitor 6 (MW)	2.726
23	Capacitor 7 (MW)	3.688	23	Capacitor 7 (MW)	1.899
24	Capacitor 8 (MW)	2.591	24	Capacitor 8 (MW)	5.268
25	Capacitor 9 (MW)	4.445	25	Capacitor 9 (MW)	3.203

D. Economic Power Loss Minimization

Tabel.L.3 Daya Aktif, Tegangan Bus Generator, Tap Trafo, dan Shunt Capacitor Hasil Simulasi Algoritma Serigala dan PSO

No	Parameter	WPA	No	Parameter	PSO
1	Daya Pembangkitan 1 (MW)	151.948	1	Daya Pembangkitan 1 (MW)	137.398
2	Daya Pembangkitan 2 (MW)	61.146	2	Daya Pembangkitan 2 (MW)	52.933
3	Daya Pembangkitan 3 (MW)	42.130	3	Daya Pembangkitan 3 (MW)	30.495
4	Daya Pembangkitan 4 (MW)	34.252	4	Daya Pembangkitan 4 (MW)	37.060
5	Daya Pembangkitan 5 (MW)	28.857	5	Daya Pembangkitan 5 (MW)	21.099
6	Daya Pembangkitan 6 (MW)	33.720	6	Daya Pembangkitan 6 (MW)	28.911
7	Tegangan Generator 1 (pu)	1.050	7	Tegangan Generator 1 (pu)	1.032
8	Tegangan Generator 2 (pu)	1.089	8	Tegangan Generator 2 (pu)	1.052
9	Tegangan Generator 3 (pu)	1.029	9	Tegangan Generator 3 (pu)	0.981
10	Tegangan Generator 4 (pu)	1.037	10	Tegangan Generator 4 (pu)	1.018
11	Tegangan Generator 5 (pu)	1.087	11	Tegangan Generator 5 (pu)	1.055
12	Tegangan Generator 6 (pu)	1.100	12	Tegangan Generator 6 (pu)	1.077
13	Tap Trafo 1 (pu)	0.950	13	Tap Trafo 1 (pu)	0.975
14	Tap Trafo 2 (pu)	0.966	14	Tap Trafo 2 (pu)	1.000
15	Tap Trafo 3 (pu)	0.960	15	Tap Trafo 3 (pu)	0.979
16	Tap Trafo 4 (pu)	0.962	16	Tap Trafo 4 (pu)	0.952
17	Capacitor 1 (MW)	4.099	17	Capacitor 1 (MW)	3.601
18	Capacitor 2 (MW)	3.000	18	Capacitor 2 (MW)	2.746
19	Capacitor 3 (MW)	2.414	19	Capacitor 3 (MW)	3.974
20	Capacitor 4 (MW)	3.610	20	Capacitor 4 (MW)	2.454
21	Capacitor 5 (MW)	4.588	21	Capacitor 5 (MW)	4.795
22	Capacitor 6 (MW)	4.213	22	Capacitor 6 (MW)	4.509
23	Capacitor 7 (MW)	4.338	23	Capacitor 7 (MW)	4.476
24	Capacitor 8 (MW)	3.316	24	Capacitor 8 (MW)	2.734
25	Capacitor 9 (MW)	4.290	25	Capacitor 9 (MW)	3.732

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hadi Saadat, Power System Analysis, second edition. McGraw-Hill, 2004.
- [2] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, Power Generation, Operation and Control, John Wiley & Sons, 1984.
- [3] Jizhong Zhu, PhD, Optimization of Power System Operation, 2009.
- [4] J. Kennedy and R. C. Eberhart. Particle swarm optimization. In Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. IEEE Service Center, Piscataway, 1995.
- [5] Mary B. Cain, Richard P. O'Neill, Anya Castillo, History of Optimal Power Flow and Formulations, 2012.
- [6] Xin-She Yang, Engineering Optimization, An Introduction with Metaheuristic Applications, John Wiley & Sons, 2010.
- [7] J. Hazra, A. K. Sinha, A Multi-Objective Optimal Power Flow Using Particle Swarm Optimization, 2010.
- [8] M. A. Abido, "Optimal Power Flow Using Particle Swarm Optimization" *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 24, No. 7, October 2002, pp. 563-571.
- [9] P. Venkatesh, K. Y. Lee, Multi-Objective Evolutionary Programming for Economic Emission Dispatch problem, *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, pp. 1-8.
- [10] S. Mirjalili, S.M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Adv.Eng.Softw.*, vol. 69, pp. 46-61, Mar. 2014.
- [11] Muangkote.Nipoteapat, et.al, "An Improved grey Wolf Optimizer for Training q-Gaussian Radial Basis Functional-link Nets", ICSEC, 2014.
- [12] Wu Hu-Sheng, "Wolfpack Algorithm for Unconstrained Global Optimization", Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering, 2014.
- [13] Mahor A., Prasad V., Rangnekar S., *Economic Dispatch Using Particle Swarm Optimization: a Review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13, p. 2134-2141.
- [14] Bratton .D, James K, "Defining a Standard for Particle Swarm Optimization", Proceedings of IEEE SIS, 2007
- [15] J. B. Park, K. S. Lee, J. R. Shin, and K. Y. Lee, A particle swarm optimization for economic dispatch with nonsmooth cost functions,

IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 20, No. 1, pp. 34-42, Feb. 2005.

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Lukman Hendarwin dilahirkan di Jakarta, 11 Maret 1993. Merupakan putra ke lima dari lima bersaudara pasangan Bapak Budiawan dan Ibu Tan Moy Fa. Penulis menempuh jenjang pendidikan dari SDK Mater Dei Tangerang Selatan, dan melanjutkan ke SMPK Mater Dei Tangerang Selatan. Kemudian penulis melanjutkan ke SMAK Mater Dei Tangerang Selatan hingga lulus tahun 2011. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan studinya ke Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Elektro

dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga.

Halaman ini sengaja dikosongkan